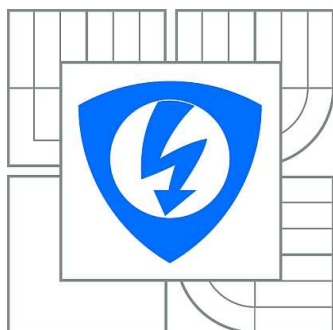


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

# OPTIMALIZACE CHLAZENÍ KONCENTRÁTOROVÉHO FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU POMOCÍ SYSTÉMŮ CAE

OPTIMIZATION OF COOLING THE PHOTOVOLTAIC CELL USING CAE SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

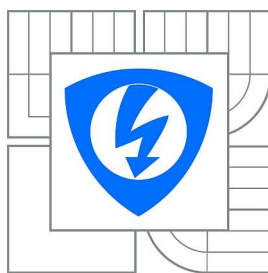
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PAVEL SODOMKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektrotechnická výroba a management

**Student:** Bc. Pavel Sodomka  
**Ročník:** 2

**ID:** 125636  
**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Optimalizace chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku pomocí systému CAE**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte matematicko-fyzikální model chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku pomocí „Metody konečných objemů“ pomocí systémů CAE (Computer-aided engineering). Na základě získaných informací pomocí matematicko-fyzikální analýzy navrhnete optimální tvar a další konstrukční úpravy pro zefektivnění chlazení. Získané výsledky vyhodnoťte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce

**Termín zadání:** 10. 2. 2014

**Termín odevzdání:** 29. 5. 2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
Předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se věnuje optimalizaci chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku pomocí systému CAE.

V teoretické části této práce se pojednává o problematice fotovoltaiky jako takové se zaměřením na koncentrátorové články s následným problémem chlazení a odvodu tepla. V další teoretické části diplomová práce rozebírá problematiku vedení a přenos tepla. V této části je uveden matematický popis proudění tekutiny. Dále je v práci rozebrána metoda konečných objemů, kterou využívá pro výpočet SolidWorks Flow Simulation.

V praktické části této práce jsou uvedeny modely a kroky, které vystihují sled celé optimalizace chlazení. Všechny navržené varianty jsou navzájem porovnány a diskutovány jejich výhody a nevýhody. V posledním kroku byl výsledný model podroben také simulaci s uvažovanou radiační složkou, která výsledky zpřesnila. Závěrem této práce je pořízena výkresová dokumentace výsledného modelu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotovoltaika, koncentrátorový článek, optimalizace chlazení, přenos a sdílení tepla, Metoda konečných objemů, SolidWorks Flow Simulation

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the optimization of the concentrate photovoltaic cell cooling system through the CAE system.

In the theoretical part, the thesis treats there the problematic of the photovoltaics and focuses on the concentrator cell and its problems coupled with the cooling system and the sink of heat. In the next theoretic part, it also analyses there the problematic of the conduit and transfer of heat. Moreover, the mathematical description of the fluid flow, the finite-volume method that is used in the SolidWorks Flow Simulation for the calculations, are also described there.

In the practical part, the models and steps which depict precisely all the process of the heat cooling optimization are mentioned. All the proposed variants are mutually compared and put up for the discussion about their advantages and disadvantages. Lastly, the resultant model was also put through the simulation with the suggested radiational component that gave precision to the results. In the end of the thesis, there was made out the documentation of the final model drawings.

## **KEYWORDS**

Photovoltaic, concentrator cell, cooling optimization, transfer and sharing of heat, finite-volume method, SolidWorks Flow Simulation

## **Bibliografická citace:**

SODOMKA, P. *Optimalizace chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku pomocí systémů CAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 104 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D..

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optimalizace chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku pomocí systému CAE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny v práci citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 28. května 2014

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále chci poděkovat rodině a partnerce Alžbětě za jejich pomoc, podporu a trpělivost.

V Brně dne 28. května 2014

.....  
podpis autora

# Obsah

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 1     | Úvod.....   | 12  |
| 2     | Fotovoltaika.....                                       | 13  |
| 2.1   | Historie .....  | 13  |
| 2.1.1 | První generace .....                                    | 14  |
| 2.1.2 | Druhá generace.....                                     | 14  |
| 2.1.3 | Třetí generace.....                                     | 14  |
| 2.2   | Slunce jako zdroj energie.....                          | 15  |
| 2.3   | Základní fotovoltaická technologie.....                 | 19  |
| 2.3.1 | Princip fotovoltaického článku .....                    | 19  |
| 2.3.2 | Voltampérová charakteristika FV článku.....             | 23  |
| 2.3.3 | Konstrukce fotovoltaických článků .....                 | 24  |
| 2.4   | Koncentrátorové fotovoltaické systémy .....             | 26  |
| 2.4.1 | Vliv teploty na fotovoltický článek .....               | 28  |
| 2.5   | Zhodnocení fotovoltaiky .....                           | 30  |
| 2.5.1 | Finanční náročnost .....                                | 30  |
| 2.5.2 | Klady a zápory.....                                     | 32  |
| 3     | Přenos tepla a proudění .....                           | 34  |
| 3.1   | Sdílení tepla vedením .....                             | 34  |
| 3.2   | Konvekce a hydrodynamika .....                          | 36  |
| 3.3   | Sdílení tepla zářením (radiací) .....                   | 39  |
| 3.4   | Základní rovnice popisující proudění.....               | 42  |
| 3.5   | Okrajové a počáteční podmínky řešení.....               | 43  |
| 4     | Použitý software .....                                  | 44  |
| 4.1   | SolidWorks .....  | 44  |
| 4.2   | SolidWorks Flow Simulation .....                        | 45  |
| 4.3   | Metoda konečných objemů .....                           | 45  |
| 4.3.1 | Dělení oblastí – tvorba geometrie a výpočetní síť ..... | 46  |
| 4.3.2 | Diskretizace .....                                      | 48  |
| 4.3.3 | Numerické řešení výpočtu .....                          | 48  |
| 5     | Základní model.....                                     | 50  |
| 6     | Simulace v programu SolidWorks Flow Simulation .....    | 53  |
| 6.1   | Základní model.....                                     | 53  |
| 6.2   | Vysavačový model.....                                   | 58  |
| 6.3   | Optimalizovaný vysavačový model.....                    | 65  |
| 6.4   | Vanový model .....                                      | 70  |
| 6.5   | Výsledný model.....                                     | 75  |
| 6.6   | Výsledný model s doporučeným objemovým tokem .....      | 82  |
| 6.7   | Výsledný model s radiací .....                          | 86  |
| 7     | Výkresová dokumentace výsledného modelu .....           | 89  |
| 7.1   | Výsledný model.....                                     | 89  |
| 7.2   | Vana.....   | 90  |
| 7.3   | Přítoková trubka.....                                   | 92  |
| 7.4   | Fotovoltaický článek.....                               | 93  |
| 8     | Zhodnocení dosažených výsledků .....                    | 94  |
| 9     | Závěr .....   | 101 |
| 10    | Literatura .....  | 102 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1 Typické hodnoty součinitele znečištění.....  | 18 |
| Tabulka 2: Porovnání účinnosti laboratorní a průmyslové výroby.....  | 22 |
| Tabulka 3: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku v základním modelu.....                                   | 53 |
| Tabulka 4: Výsledky simulací v základním modelu s různými vzdálenostmi.....                                    | 58 |
| Tabulka 5: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku na modelu s vysavačovým přítokem..                        | 58 |
| Tabulka 6: Výsledné hodnoty při změně vzdáleností fotovoltaickém článku a skla .....                           | 64 |
| Tabulka 7: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku na optimalizovaném modelu<br>s vysavačovým přítokem ..... | 66 |
| Tabulka 8: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku ve vanovém modelu.....                                    | 71 |
| Tabulka 9: Výsledná teplota fotovoltaického článku na výsledném modelu .....                                   | 76 |
| Tabulka 10: Srovnání výsledného modelu s různými objemovými toky .....   | 81 |
| Tabulka 11: Výsledná teplota fotovoltaického článku na výsledném modelu s doporučeným<br>objemovým tokem.....  | 82 |
| Tabulka 12: Výsledná teplota fotovoltaického článku na výsledném modelu s radiací.....                         | 86 |
| Tabulka 13: Srovnání všech modelů s doporučeným objemovým tokem .....  | 95 |

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obr. 2-1 Složení Slunce .....   | 16 |
| Obr. 2-2 Intenzita záření v časovém období [5] .....  | 17 |
| Obr. 2-3: Sluneční mapa ČR [4] .....  | 18 |
| Obr. 2-4: Osvětlení článku – PN přechod [7].....  | 20 |
| Obr. 2-5: Znázorněný princip činnosti fotovoltaického článku [8].....   | 20 |
| Obr. 2-6: Napětí mezi kontakty – rozdělení nábojů [10] .....  | 21 |
| Obr. 2-7 Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím<br>fotoelektrického jevu [3].....  | 21 |
| Obr. 2-8: Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [3].....  | 22 |
| Obr. 2-9: Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku [3].....  | 23 |
| Obr. 2-10: Využitelné spektrum záření pro články Si [3] .....   | 25 |
| Obr. 2-11: Struktura fotovoltaického modulu z Si [3].....   | 26 |
| Obr. 2-12: Hybridní solární elektrárna na Floridě [9] .....   | 27 |
| Obr. 2-13: Příklad koncentrátorového fotovoltaického systému [13] .....   | 28 |
| Obr. 2-14: Vliv teploty na VA charakteristiku FV článku [11].....   | 29 |
| Obr. 2-15: Vliv teploty na P charakteristiku FV článku [11] .....   | 30 |
| Obr. 2-16: Pokles ceny fotovoltaických modulů [10].....   | 31 |
| Obr. 2-17: Vývoj roční produkce solárních panelů v MW celosvětově a v jednotlivých<br>regionech [14].....   | 32 |
| Obr. 3-1: Princip vedení tepla stěnou.....  | 35 |
| Obr. 3-2: Typy proudění .....   | 37 |
| Obr. 3-3: Rozložení spektra záření [10].....  | 40 |
| Obr. 4-1: Příklad výpočetní sítě .....  | 46 |
| Obr. 4-2: Tvar konečného objemu .....   | 47 |
| Obr. 4-3: Diskretizace funkce.....  | 48 |
| Obr. 4-4: Cyklus výpočtu .....  | 49 |
| Obr. 5-1: Namodelovaný základní funkční model v programu SolidWorks.....  | 50 |
| Obr. 5-2: Skutečný základní model.....  | 50 |
| Obr. 5-3: Pozice jednotlivých částí základního funkčního modelu (1 – Vana, 2 - Fotovoltaický<br>článek, 3 – sklo, 4 – Přítoková trubka, 5 – Sloupek, 6 – šroub) ..... | 51 |



|   |    |
|---|----|
| Obr. 5-4: Výkresová dokumentace základního tvaru.....   | 51 |
| Obr. 5-5: Výkresová dokumentace základního modelu (Řez B-B) .....   | 52 |
| Obr. 5-6: Výkresová dokumentace základního modelu (Řez A-A) .....   | 52 |
| Obr. 6-1: Nastavená výpočetní síť pro základní model.....   | 53 |
| Obr. 6-2: Simulace zahřívání základního modelu .....  | 54 |
| Obr. 6-3: Simulace zahřívání základního modelu pohled ze shora .....  | 54 |
| Obr. 6-4: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku<br>v základním modelu .....                    | 55 |
| Obr. 6-5: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku<br>v základním modelu .....                       | 55 |
| Obr. 6-6: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku<br>v základním modelu .....                       | 56 |
| Obr. 6-7: Simulace proudění média základního modelu.....  | 56 |
| Obr. 6-8: Simulace proudění média základního modelu, pohled ze shora.....   | 56 |
| Obr. 6-9: Simulace rychlosti proudění základního modelu, pohled ze shora.....   | 57 |
| Obr. 6-10: Simulace rychlosti proudění základního modelu, pohled ze shora.....  | 57 |
| Obr. 6-11: Popis základního provedení.....  | 57 |
| Obr. 6-12: Nastavená výpočetní síť pro vysavačový model.....  | 59 |
| Obr. 6-13: Simulace zahřívání na modelu s vysavačovým přívodem.....   | 59 |
| Obr. 6-14: Simulace zahřívání na modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora .....   | 59 |
| Obr. 6-15: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve<br>vysavačovém modelu .....                | 60 |
| Obr. 6-16: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve<br>vysavačovém modelu .....                   | 60 |
| Obr. 6-17: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve<br>vysavačovém modelu .....                   | 61 |
| Obr. 6-18: Simulace proudění na modelu s vysavačovým přívodem .....   | 61 |
| Obr. 6-19: Simulace proudění na modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora .....  | 61 |
| Obr. 6-20: Simulace rychlosti proudění média na modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze<br>shora.....                                    | 62 |
| Obr. 6-21: Simulace rychlosti proudění média na modelu s vysavačovým přívodem .....   | 62 |
| Obr. 6-22: Popis vysavačového provedení.....  | 63 |
| Obr. 6-23: Grafické zobrazení maximální teploty na rychlosti proudění při snižování velikosti C<br>.....                                  | 64 |
| Obr. 6-24: Grafické zobrazení průměrné teploty na rychlosti proudění při snižování velikosti C<br>.....                                   | 65 |
| Obr. 6-25: Optimalizovaný vysavačový model.....   | 66 |
| Obr. 6-26: Nastavená výpočetní síť pro optimalizovaný vysavačový model.....   | 67 |
| Obr. 6-27: Simulace zahřívání na modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora .....   | 67 |
| Obr. 6-28: Simulace zahřívání na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem.....   | 67 |
| Obr. 6-29: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku v<br>optimalizovaném vysavačovém modelu ..... | 68 |
| Obr. 6-30: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku v<br>optimalizovaném vysavačovém modelu .....    | 68 |
| Obr. 6-31: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku v<br>optimalizovaném vysavačovém modelu .....    | 69 |
| Obr. 6-32: Simulace proudění na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem .....   | 69 |
| Obr. 6-33: Simulace proudění na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze<br>shora.....                                    | 69 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 6-34: Simulace rychlosti proudění média na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora.....                                | 70 |
| Obr. 6-35: Simulace rychlosti proudění média na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem.....   | 70 |
| Obr. 6-36: Vanový model.....   | 70 |
| Obr. 6-37: Nastavená výpočetní síť pro vanový model.....   | 71 |
| Obr. 6-38: Detail nastavené výpočetní sítě vanového modelu.....  | 71 |
| Obr. 6-39: Simulace zahřívání na vanovém modelu, pohled ze shora.....  | 71 |
| Obr. 6-40: Simulace zahřívání na vanovém modelu.....   | 72 |
| Obr. 6-41: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vanovém modelu .....                                | 72 |
| Obr. 6-42: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vanovém modelu .....                                   | 73 |
| Obr. 6-43: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vanovém modelu .....                                   | 73 |
| Obr. 6-44: Simulace proudění na vanovém modelu.....  | 74 |
| Obr. 6-45: Detail proudění na vanovém modelu.....  | 74 |
| Obr. 6-46: Simulace proudění na vanovém modelu, pohled ze shora.....   | 74 |
| Obr. 6-47: Simulace rychlosti proudění média na vanovém modelu, pohled ze shora.....   | 75 |
| Obr. 6-48: Simulace rychlosti proudění média na vanovém modelu.....  | 75 |
| Obr. 6-49: Výsledný model v řezu .....   | 75 |
| Obr. 6-50 Výsledný model, uchycení fotovoltaického článku .....  | 75 |
| Obr. 6-51: Výsledný model .....  | 76 |
| Obr. 6-52: Nastavená výpočetní síť pro výsledný model .....  | 76 |
| Obr. 6-53: Detail nastavené výpočetní sítě výsledného modelu .....   | 77 |
| Obr. 6-54: Simulace zahřívání na výsledném modelu, pohled ze shora .....   | 77 |
| Obr. 6-55: Simulace zahřívání na výsledném modelu .....  | 77 |
| Obr. 6-56: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu.....                               | 78 |
| Obr. 6-57: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu.....                                  | 78 |
| Obr. 6-58: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu.....                                  | 79 |
| Obr. 6-59: Simulace proudění na výsledném modelu, pohled ze shora.....   | 79 |
| Obr. 6-60: Simulace proudění na výsledném modelu.....  | 79 |
| Obr. 6-61: Detail proudění na výsledném modelu .....   | 80 |
| Obr. 6-62: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu, pohled ze shora.....   | 80 |
| Obr. 6-63: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu.....  | 80 |
| Obr. 6-64: Grafická závislost teploty na objemovém toku ve výsledném modelu.....   | 81 |
| Obr. 6-65: Simulace zahřívání na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem, pohled ze shora .....   | 82 |
| Obr. 6-66: Simulace zahřívání na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem.....   | 82 |
| Obr. 6-67: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem..... | 83 |
| Obr. 6-68: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem.....    | 84 |
| Obr. 6-69: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem.....    | 84 |

|  |     |
|--|-----|
| Obr. 6-70: Simulace proudění na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem, pohled ze shora .....                                      | 85  |
| Obr. 6-71: Detail proudění na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem.....  | 85  |
| Obr. 6-72: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem, pohled ze shora.....                       | 85  |
| Obr. 6-73: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem.....  | 86  |
| Obr. 6-74: Simulace zahřívání na výsledném modelu s radiací.....   | 86  |
| Obr. 6-75: Simulace zahřívání na výsledném modelu s radiací, pohled ze shora.....  | 87  |
| Obr. 6-76: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s radiací.....             | 87  |
| Obr. 6-77: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s radiací.....                | 88  |
| Obr. 6-78: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s radiací.....                | 88  |
| Obr. 7-1: Pozice jednotlivých částí výsledného modelu (1 – Vana, 2 - Fotovoltaický článek, 3 – Přítoková trubka, 4 – Sklo, 5 – Šroub)..... | 89  |
| Obr. 7-2: Základní pohled - nárys výsledného modelu.....   | 89  |
| Obr. 7-3: Pohled řezu A-A výsledného modelu.....   | 89  |
| Obr. 7-4: Půdorys výsledného modelu.....   | 90  |
| Obr. 7-5: Nárys vany výsledného modelu .....   | 90  |
| Obr. 7-6: Půdorys vany výsledného modelu.....  | 91  |
| Obr. 7-7: Pohled řezu A-A vany.....  | 91  |
| Obr. 7-8: Pohled řezu B-B vany .....   | 91  |
| Obr. 7-9: Pohled řezu C-C vany .....   | 92  |
| Obr. 7-10: Výkres přítokové trubky ve výsledném modelu .....   | 92  |
| Obr. 7-11: Výkres fotovoltaického článku ve výsledném modelu .....   | 93  |
| Obr. 8-1: Grafické srovnání všech modelů ukazující maximální teplotu fotovoltaického článku s doporučeným objemovým tokem .....            | 96  |
| Obr. 8-2: Grafické srovnání všech modelů ukazující průměrnou teplotu fotovoltaického článku s doporučeným objemovým tokem .....            | 96  |
| Obr. 8-3: Srovnání teplotních průběhů v ose $\frac{1}{4}$ od okraje článku .....   | 97  |
| Obr. 8-4: Srovnání teplotních průběhů v ose šroubového spoje článku.....   | 97  |
| Obr. 8-5: Srovnání teplotních průběhů v ose poloviny článku .....  | 98  |
| Obr. 8-6: Srovnání teplotních průběhů v ose okraje článku .....  | 99  |
| Obr. 8-7: Srovnání teplotních průběhů s uvažovanou radiací.....  | 100 |

# 1 Úvod

Solární článek přeměňuje energii z obnovitelného zdroje záření, čímž je nejčastěji Slunce, na energii elektrickou. Základní myšlenkou fotovoltaiky je snaha o dosažení co největší účinnosti solárního panelu (článku). Abychom byly schopni vytěžit ze slunečního záření co nejvíce, je při současné technologii vhodné používat články koncentrátorové. Tyto články obsahují čočky nebo zrcadla, které koncentrují sluneční záření. Tímto způsobem se uspoří plocha solárních článků. Nevýhodou tohoto řešení je, že se zvýší tepelné nároky na chlazení tohoto článku díky zvýšené proudové hustotě. Dále při přeměně tepla na elektrickou energii dochází ke ztrátám, které se projevují v podobě tepla. Zde je problém, který je nutno řešit efektivním a stabilním způsobem chlazení. [9]

## 2 Fotovoltaika

Fotovoltaika je obor, který se zabývá přeměnou energie slunečního záření na energii elektrickou. Na povrch Země dopadá sluneční záření. Solární fotovoltaické články jsou schopny z tohoto záření vyrábět stejnosměrný elektrický proud, který se používá pro nabíjení akumulátorů nebo přímou spotřebu. Tato výrazně ekologická přeměna energie je k dispozici téměř v neomezeném množství, neboť zdrojem energie je sluneční světlo. Fotovoltaické systémy jsou alternativním zdrojem, který nabízí ekologicky nezávadné, spolehlivé a jednoduché řešení dodávky elektrické energie v místech, kde není dostupná elektrická síť. Vzhledem k nízkým provozním nákladům a minimálním nárokům na údržbu jsou velmi vhodné pro elektrifikaci chat, rekreačních objektů, jachet, karavanů, nabíjení akumulátorů či čerpání vody. Z průmyslových aplikací lze uvést například napájení měřících, řídicích, komunikačních nebo zabezpečovacích systémů stabilních i mobilních. Pokud se jedná o výkony v rozsahu jednotek až stovek wattů, jsou náklady, zvláště při větších vzdálenostech od elektrizační sítě, mnohem nižší než budování nové síťové přípojky. Při činnosti fotovoltaického systému nevznikají žádné emise, odpady a hluk, které by zatěžovaly životní prostředí. Jeho provoz nevyžaduje téměř žádnou obsluhu a údržbu. [1]

### 2.1 Historie

Pojem fotovoltaika pochází ze dvou slov, řeckého φώς [phos] = světlo a ze jména italského fyzika Alessandra Volty. Objev fotovoltaického jevu se pak připisuje Alexandru Edmondu Becquerelovi, který jej jako devatenáctiletý mladík odhalil při experimentech v roce 1839. V roce 1904 jej fyzikálně popsal Albert Einstein a v roce 1921 mu byla za „práce pro rozvoj teoretické fyziky, zejména objev zákona fotoelektrického efektu“ udělena Nobelova cena. Již v roce 1916 pak další držitel této ceny Robert Millikan experimentálně potvrdil platnost principu fotovoltaického jevu. Prvotní pokusy s fotočládky spadají do sedmdesátých let 19. století, kdy byly poprvé zjištěny změny vodivosti selenu při jeho osvětlení a kolem r. 1883 byl sestaven první selenový fotočlánek s tenkou vrstvou zlata (Charles Fritts, účinnost pod 1%). První patent na solární článek pak byl podán v roce 1946 Russellem Ohlem, který také stál na počátku rozvoje křemíkových solárních článků (1941). První skutečný fotovoltaický článek s 6% účinností byl vyroben z krystalického křemíku v roce 1954 v Bellových laboratořích (G.L. Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller).

Větší rozvoj fotovoltaiky nastává v šedesátých letech s nástupem kosmického výzkumu, sluneční články slouží jako zdroj energie pro družice. Vůbec první družicí využívající k získání energie sluneční paprsky byl ruský Sputnik 3, vypuštěný 15. května 1957. Dalším důležitým mezníkem pro rozvoj fotovoltaiky a zejména výzkumu a vývoje v této oblasti byla celosvětová ropná krize v roce 1973. [2]

### **2.1.1 První generace**

První generací se nazývají fotovoltaické články využívající jako základ křemíkové desky. Jsou dnes nejrozšířenější technologií na trhu (cca 90%) a dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (v sériové výrobě 16 až 19%, speciální struktury až 24%). Komerčně se začaly prodávat v sedmdesátých letech minulého století. Přestože je jejich výroba relativně drahá (a to zejména z důvodu drahého vstupního materiálu – krystalického křemíku), budou ještě s největší pravděpodobností v několika dalších letech na trhu dominovat. [2]

### **2.1.2 Druhá generace**

Impulem pro rozvoj článků druhé generace byla především snaha o snížení výrobních nákladů úsporou drahého základního materiálu – křemíku. Články druhé generace se vyznačují stokrát až tisíckrát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou (tzv. thin-film) a jejími představiteli jsou např. články z amorfního a mikrokřemíkového křemíku (případně silicon-germania či silicon-karbidu, ale také tzv. směsné polovodiče z materiálů jako Cu, In, Ga, S, Se označované obecně jako CIS struktury). S úsporou materiálu došlo v porovnání s články první generace k poklesu výrobních nákladů (a tedy za předpokladu velkosériové výroby i k poklesu ceny), nicméně dosahovaná účinnost je obvykle nižší (v sériové výrobě obecně pod 10%). Nespornou výhodou tenkovrstvých článků je ale možnost volby substrátu (na nějž se tenkovrstvé struktury deponují) a v případě použití flexibilních materiálů (organické, kovové či textilní folie) i značně širší aplikační sféra. Komerčně se začaly články druhé generace prodávat v polovině osmdesátých let. [2]

### **2.1.3 Třetí generace**

Pokus o „fotovoltaickou revoluci“ představují solární články třetí generace. Zde je hlavním cílem nejen snaha o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně

generovaných párů elektron - díra (jedná se o tzv. „proudový zisk“), ale i maximalizace využití energie dopadajících fotonů (tzv. „napěťový zisk“ fotovoltaických článků). Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:

- vícevrstvé solární články (z tenkých vrstev)
- články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly nosiče náboje pro generování většího množství párů elektron – díra
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i selektivně vyzařujícím radiátorem
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívající kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů)

Zatím jediným komerčním příkladem dobře fungujících článků třetí generace (přímo navazujících na fotovoltaické články druhé generace) jsou vícevrstvé struktury (dvojvrstvé – tzv. tandemy a trojvrstvé články), z nichž každá substruktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tak energetická využitelnost fotonů. Příkladem tandemového solárního článku je struktura skládající se z p-i-n přechodu amorfního (hydrogenovaného) křemíku (a-Si:H) a p-i-n přechodu mikrokrytalického (hydrogenovaného) křemíku ( $\mu$ c-Si:H). Amorfní křemík má vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté části spektra, mikrokrytalický křemík pak dobře absorbuje i v oblasti červené a infračervené. Mikrokrytalický křemík může být nahrazen i „slitinou“ křemíku s germániem a dle zvoleného poměru obou materiálů se dají upravovat i jejich optické (či elektrické) vlastnosti. Těchto materiálů se např. využívá komerčně právě pro trojvrstvé solární články, kde dva spodní články jsou vyrobeny s různou koncentrací Si a Ge. Základní podmínkou pro dobrou funkci vícevrstevných článků je, aby každý z článků generoval stejný proud. V opačném případě pak ten horší (příp. nejhorší) z článků limituje a celkově snižuje dosažitelnou účinnost. [2]

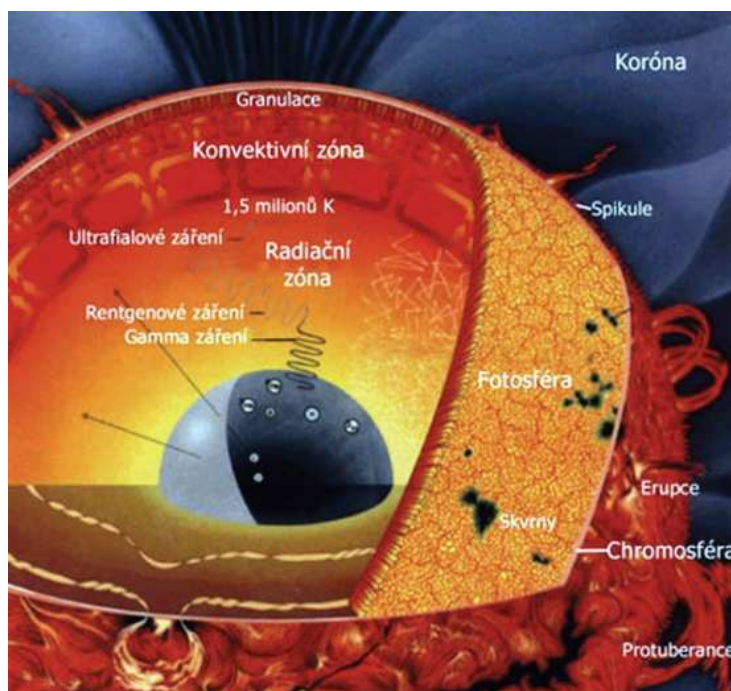
## 2.2 Slunce jako zdroj energie

Sluneční záření patří mezi nejčistší a nejdostupnější zdroje energie na Zemi. Slunce je zdrojem zářivé energie v celém rozsahu spektra od nejmenších vlnových délek rentgenového a

ultrafialového záření, až po metrové délky záření rádiového. Světelné a infračervené záření o vlnové délce 0,2  $\mu\text{m}$  až 3  $\mu\text{m}$  je však nejčtenější (lidské oko vnímá záření v rozsahu 0,38 až 0,76  $\mu\text{m}$ ). Hmotnost Slunce je asi 330 000 krát větší než hmotnost Země a představuje 99,8% hmotnosti sluneční soustavy. Stáří Slunce se odhaduje na 4,6 miliard let, což je řadí mezi hvězdy středního věku. Předpokládá se, že bude svítit ještě asi 5 až 7 miliard let. Teplota na povrchu Slunce je přibližně 5800 K, proto je lidé vnímají jako žluté (i když maximum jeho vyzařování je v zelené části viditelného spektra). Průměr Slunce je zhruba 1 400 000 km, což je asi 109 průměrů Země. Jeho objem je tedy asi 1,3 milionkrát větší než objem Země. Hustota Slunce je průměrně 1400 kg m<sup>-3</sup>. Slunce je koule žhavého plazmatu, která neustále produkuje ohromné množství energie. Jeho výkon je zhruba  $4 \times 10^{26}$  W, z čehož na Zemi dopadá asi 45 miliardtin. Přibližně polovina zářivého toku Slunce je pohlcena zemským povrchem a následně je vyzařena ve formě IR záření do vesmíru. Velká část energie je spotřebována k odpaření vody v oceánech. [3]

Ke vzniku energie Slunce dochází v jeho nitru, které se skládá ze tří částí (Obr. 2-1):

- jádro, kde probíhá termonukleární reakce (teplota  $13 \cdot 10^6$  K)
- oblast atmosféry, kde vzniká elektromagnetické záření (fotosféra, chromosféra => koróna)
- sluneční vítr, kde dochází k emisi protonů,  $\alpha$  částic a elektronů

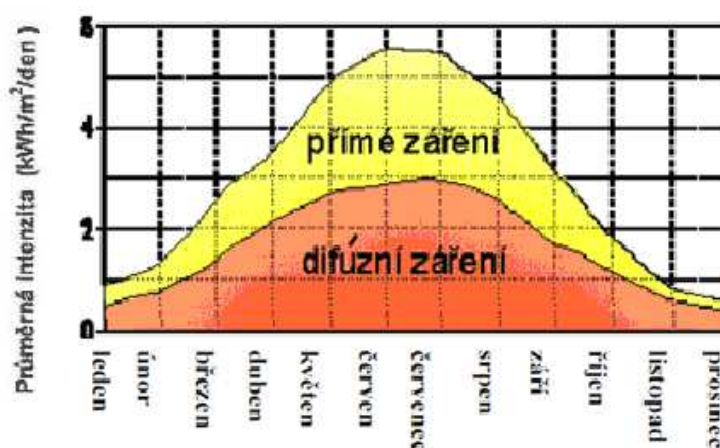


Obr. 2-1 Složení Slunce



Slunce nemá homogenní složení, ale jeho chemické složení je závislé na hloubce. V jádře vlivem jaderných reakcí je větší obsah helia, než na jeho povrchu. Předpokládá se, že v jádře je vodík zastoupen již 34 % a hélium 64 %. Spektrum současně ukazuje, že se ve Slunci nachází ve stopovém množství většina prvků, které jsou známy na Zemi. Pokud bychom chtěli složení Slunce vyjádřit v hmotnostních poměrech, můžeme říci, že je složeno přibližně ze 75% vodíku a 25% helia. Sluneční záření můžeme rozdělit do dvou složek:

- přímé sluneční záření (IP)
- difúzní sluneční záření (ID)
  - jde o rozptýlené světlo o odrazu o molekuly plynů, prachu a mraky
  - intenzita difúzního záření vzrůstá se součinitelem znečištění (Z)



Obr. 2-2 Intenzita záření v časovém období [5]

Teoretické množství energie dopadající za jednotku času na jednotkovou plochu mimo zemskou atmosféru se nazývá sluneční konstanta a její hodnota je přibližně  $I_0 = 1360 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Mírou zmenšení intenzity tohoto záření je tzv. součinitel znečištění Z, který závisí na obsahu příměsí a atmosférickém tlaku vzduchu. Charakteristické hodnoty součinitele znečištění jsou uvedeny v Tabulka 1.

Intenzitu přímého slunečního záření dopadající na plochu kolmou k paprskům ( $I_{PN}$ ) můžeme popsat rovnicí (1).

$$I_{PN} = I_0 \cdot A^{-Z} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (1)$$

Pro obecně položenou plochu pak platí:

$$I_P = I_{PN} \cdot \cos \gamma \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (2)$$

kde  $\gamma$  - úhel dopadu slunečních paprsků

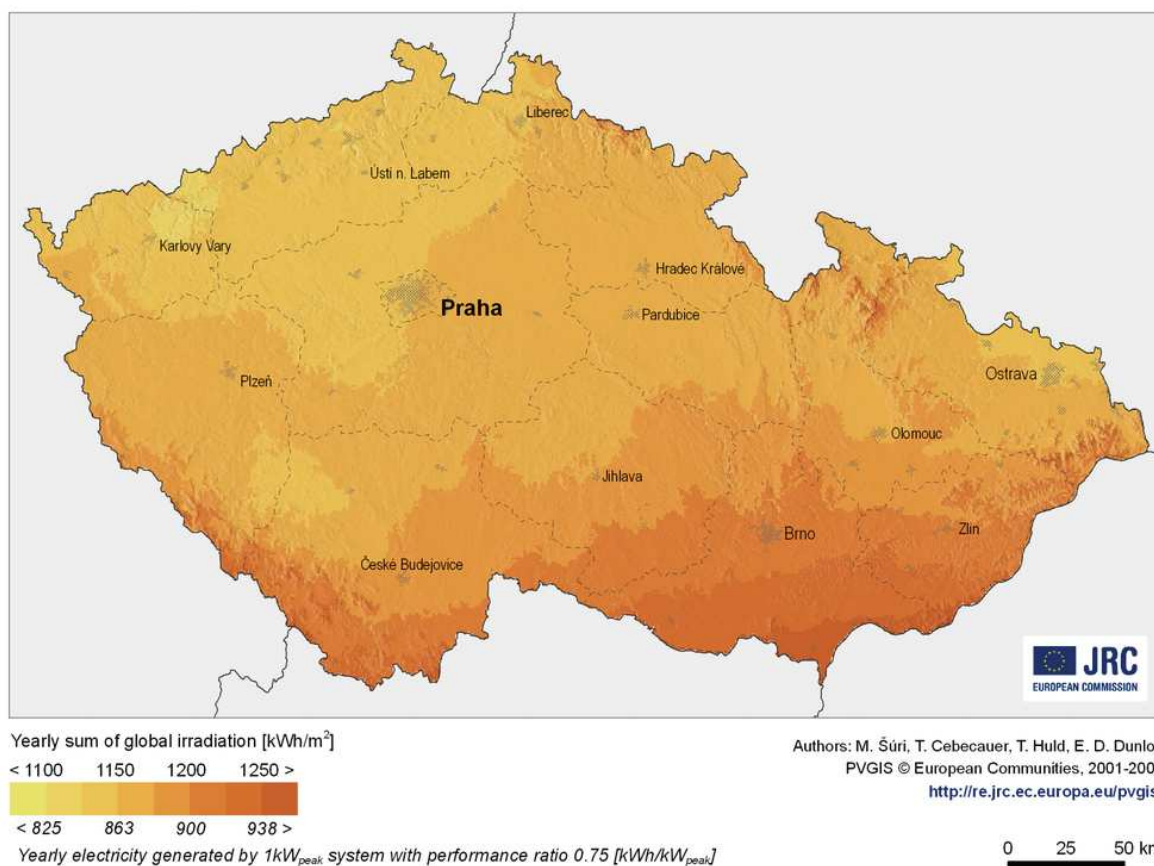
Teoretické množství energie dopadající na osluněnou plochu za den je závislé na sklonu kolektoru  $\alpha$  a součiniteli znečištění  $Z$ . Optimální úhel pro maximální využití slunečního záření se v průběhu roku mění následovně:

- letní období  $30^\circ - 45^\circ$
- zimní období  $60^\circ - 90^\circ$

| Typ oblasti                      | Součinitel znečištění $Z$ |
|----------------------------------|---------------------------|
| Místa nad 2000 m n.m.            | 2,0                       |
| Místa nad 1000 m n.m.            | 2,5                       |
| venkov bez průmyslových exhalací | 3,0                       |
| Město a průmyslová střediska     | 4,0                       |
| Silně znečištěné prostředí       | $\geq 5,0$                |

**Tabulka 1** Typické hodnoty součinitele znečištění

Pro ilustraci je na následujícím obrázku (Obr. 2-1) zobrazena sluneční mapa pro oblast České republiky. Z uvedené mapy je zřejmé, že nejvhodnější oblasti pro aplikaci fotovoltaických elektráren jsou na jižní Moravě a v jižních Čechách.



**Obr. 2-3: Sluneční mapa ČR [4]**

## 2.3 Základní fotovoltaická technologie

Elektrická energie získaná přímou přeměnou slunečního záření je známa již z 19. století. Rozvoj fotovoltaických aplikací byl a stále ještě je závislý na technické úrovni a znalostech především z oblasti fyziky polovodičů. Vlastní fotovoltaické systémy pak představují spojení fotovoltaických součástek do řetězce, na jehož konci jsou elektrické spotřebiče. [3]

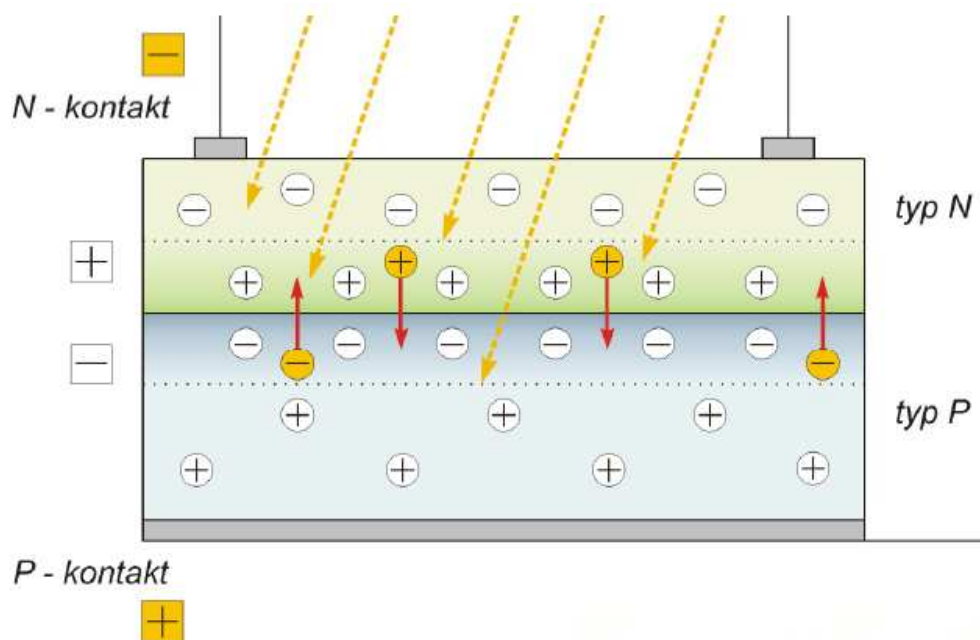
### 2.3.1 Princip fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek je základním prvkem systémů pro přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Ať již je typ článku jakýkoliv, vždy se jedná o velkoplošnou polovodičovou součástku s jedním nebo i více PN přechody. Rozměry komerčně vyráběných solárních článků nejsou větší než 200 mm a tloušťka nepřesahuje přes 400  $\mu\text{m}$ . Jedná se tedy o velice tenké destičky. Přední strana solárního článku je uzpůsobena k pohlcování slunečního záření. Solární články jsou ve většině případů opatřeny ze přední i zadní strany kovovými kontakty pro připojení sběrných vodičů. [6]

Základním principem FV článku je fotoelektrický jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry) a mohou nastat tyto případy:

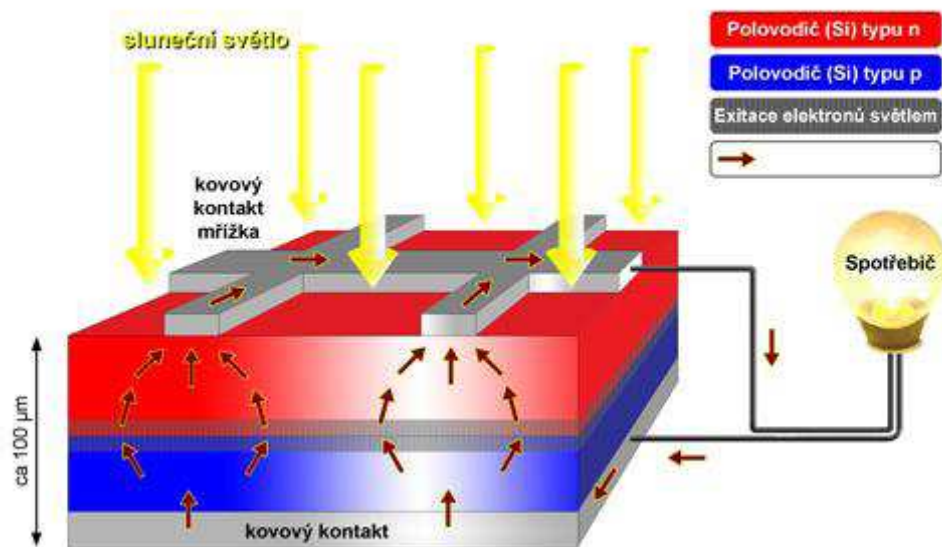
- **interakce částice s mřížkou**, kde je využití nízkoenergetických fotonů,
- **interakce s volnými elektrony**, kde dochází pouze ke zvýšení teploty (fototermální systémy),
- **interakce s vázanými elektrony**, kde vznikají volné nosiče náboje a může dojít k uvolnění elektronu z vazby.

Pro funkci FV článku je zásadní, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. V kovech ovšem dojde k jejich okamžité rekombinaci, které je potřeba zabránit a vzniklý náboj tedy odvézt z článku. Pro tento účel se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu (Obr. 2-4). [3]



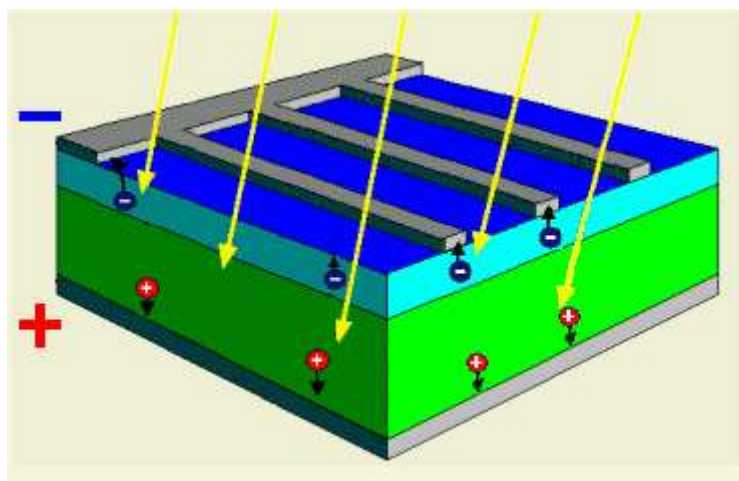
Obr. 2-4: Osvětlení článku – PN přechod [7]

#### Princip činnosti fotovoltaického článku



Obr. 2-5: Znáznorněný princip činnosti fotovoltaického článku [8]

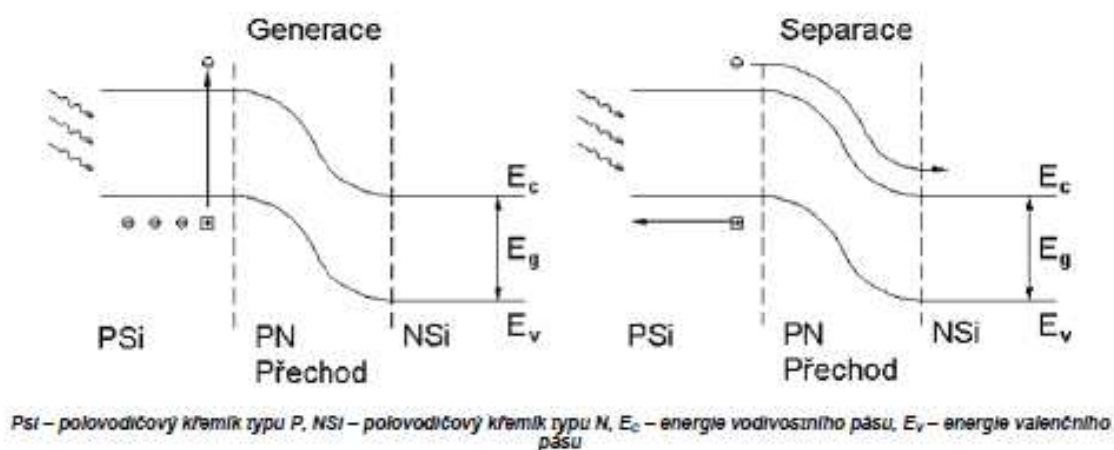
U Obr. 2-6 je již znázorněna pokročilá fáze celkového rozložení nábojů po dopadu slunečního záření. Elektrické náboje jsou rozloženy tak, že majoritní nosiče jsou ve svých dominantních pozicích (elektrony v polovodiči typu N a díry v polovodiči typu P). To má za následek, že fotovoltaický článek funguje jako zdroj napětí. [9]



Obr. 2-6: Napětí mezi kontakty – rozdělení nábojů [10]

Nejjednodušší fotovoltaický článek můžeme tedy popsat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem. Aby mohla fotovoltaická přeměna probíhat, musí být splněny následující podmínky:

- foton musí být pohlcen,
- foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu,
- vzniklá dvojice elektron (-) – díra (+) musí být separována, aby se znovu nespojila,
- oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči.



Obr. 2-7 Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím fotoelektrického jevu [3]

U klasických solárních článků se uvádí maximální výkon  $P$  pro jeden článek  $1,5 \text{ W}$  (napětí  $U = 0,5 \text{ V}$  a proud  $I = 3 \text{ A}$ ). Velikost solárního článku může být omezena použitou technologií. Často však bývá tloušťka vrstvy, kterou je fotovoltaická vrstva tvořena o rozměru  $0,5 \text{ mm}$ .

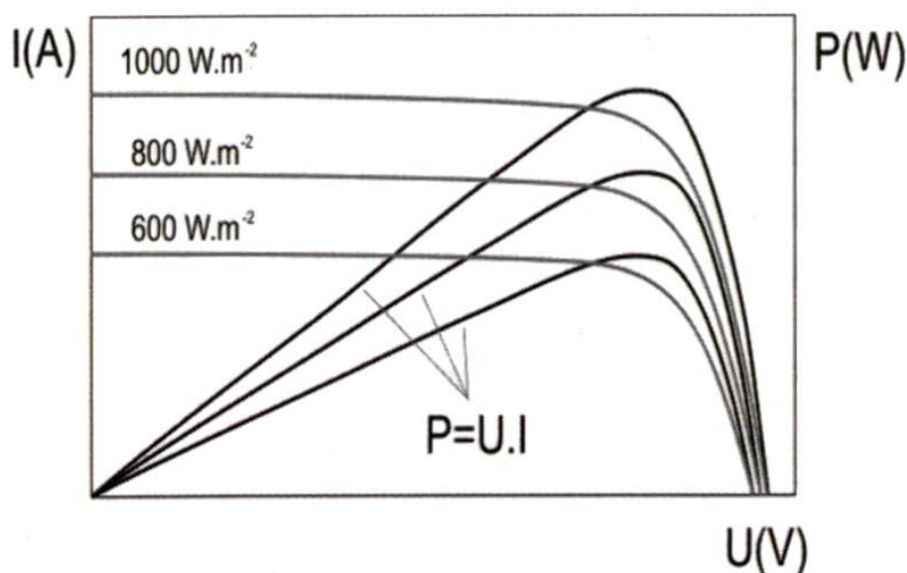
Tato vrstva je, jak již bylo zmíněno, vyrobena z monokrystalického křemíku, který bývá velmi často o velikosti  $125 \times 125 \text{ mm}$ .

Hodnota elektrického proudu, který je možné odebrat z fotovoltaického článku, závisí na ploše, na kterou dopadá sluneční záření. U článků vyrobených z křemíku se tato hodnota pohybuje okolo  $80 \text{ W/m}^2$  až  $100 \text{ W/m}^2$ . Mnohem důležitějším parametrem pro určení kvalitního článku je jeho efektivita (účinnost). Účinnost článku se odvíjí od použitého materiálu, ale také na technologickém procesu výroby. Rozlišujeme výrobu laboratorní a průmyslovou, viz Tabulka 2. [9]

| Křemíkový materiál | Laboratorní výroba (%) | Součinitel znečištění Z |
|--------------------|------------------------|-------------------------|
| monokrystalický    | 24                     | 14 - 17                 |
| polykrystalické    | 18                     | 13 - 15                 |
| amorfni            | 13                     | 5,7                     |

**Tabulka 2: Porovnání účinnosti laboratorní a průmyslové výroby**

Účinnost fotovoltaických článků dále závisí na intenzitě dopadajícího záření a na velikosti sériového a paralelního odporu. V případě malého sériového odporu  $R_s$  účinnost článků s rostoucí intenzitou záření roste, dosahuje maxima a až při velkých intenzitách záření začíná klesat. V případě velkého sériového odporu účinnost článků s rostoucí intenzitou záření klesá (tento efekt se projevuje zejména u tenkovrstvých FV článků). Možné průběhy závislosti účinnosti fotovoltaických článků na intenzitě slunečního záření jsou vidět na Obr. 2-8.

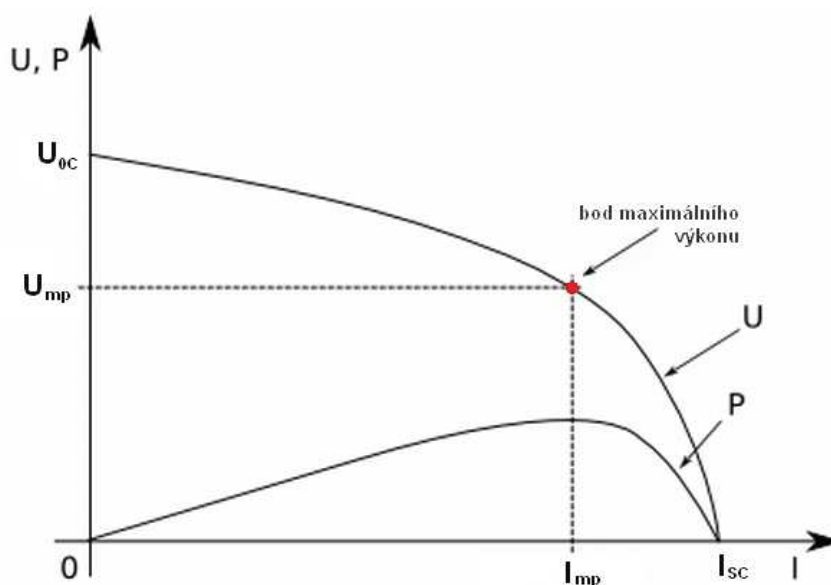


**Obr. 2-8: Vliv intenzity slunečního záření na výkon FV článku [3]**



### 2.3.2 Voltampérová charakteristika FV článku

Voltampérová charakteristika (Obr. 2-9) je základní informací o činnosti fotovoltaických článků. Hraniční veličiny na voltampérové charakteristice jsou napětí naprázdno ( $U_{0C}$ ) a proud nakrátko ( $I_{SC}$ ). Napětí naprázdno představuje maximální napětí na článku, kterého je možno dosáhnout v případě, že ke článku není připojen žádný spotřebič. Proud nakrátko představuje maximální proud (zkratový proud), který může solární článek při dané intenzitě slunečního záření dodávat.



Obr. 2-9: Zatěžovací a výkonová charakteristika FV článku [3]

Výkon solárního článku se určuje jako součin proudu a napětí. Pro každý článek existuje pracovní bod na charakteristice, ve kterém je výkon největší. Tento bod je označován jako bod maximálního výkonu (MPP) o napětí  $U_{mp}$  a proudu  $I_{mp}$ . Výkon určitého fotovoltaického článku ( $P$ ) závisí na ozáření, na spektru světla a na teplotě článku. Pro výkon fotovoltaického článku můžeme tedy napsat rovnici:

$$P = U_{mp} * I_{mp} \quad (W) \quad (3)$$

Dalšími charakteristickými provozními hodnotami fotovoltaického článku jsou činitel plnění (FF – Fill Factor) a účinnost ( $\eta$ ). Činitel plnění je charakterizován jako podíl maximálního výkonu v bodu MPP a maximálního výkonu definovaného pomocí maximálního napětí a maximálního proudu.

Můžeme tedy napsat rovnici:

$$FF = \frac{U_{mp} * I_{mp}}{U_{OC} * I_{SC}} \quad (4)$$

Pro účinnost FV článku můžeme napsat rovnici (5). Z rovnice je patrné, že účinnost je definována jako podíl maximálního výkonu článku v bodu MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření ( $P_{in}$ ).

$$\eta = \frac{U_{mp} * I_{mp}}{P_{in}} \quad (\%) \quad (5)$$

Tyto výše uvedené charakteristické ukazatele jsou vždy určovány za standardních testovacích podmínek, tj. při standardní testovací teplotě  $STC = 25^{\circ}C$ , intenzitě slunečního záření  $I = 1000 \text{ W.m}^{-2}$  a definované vzduchové hmotě (Air Mass)  $AM = 1,5$ . Na průběh voltampérové charakteristiky má vliv především hodnota intenzity slunečního záření a teplota. [3]

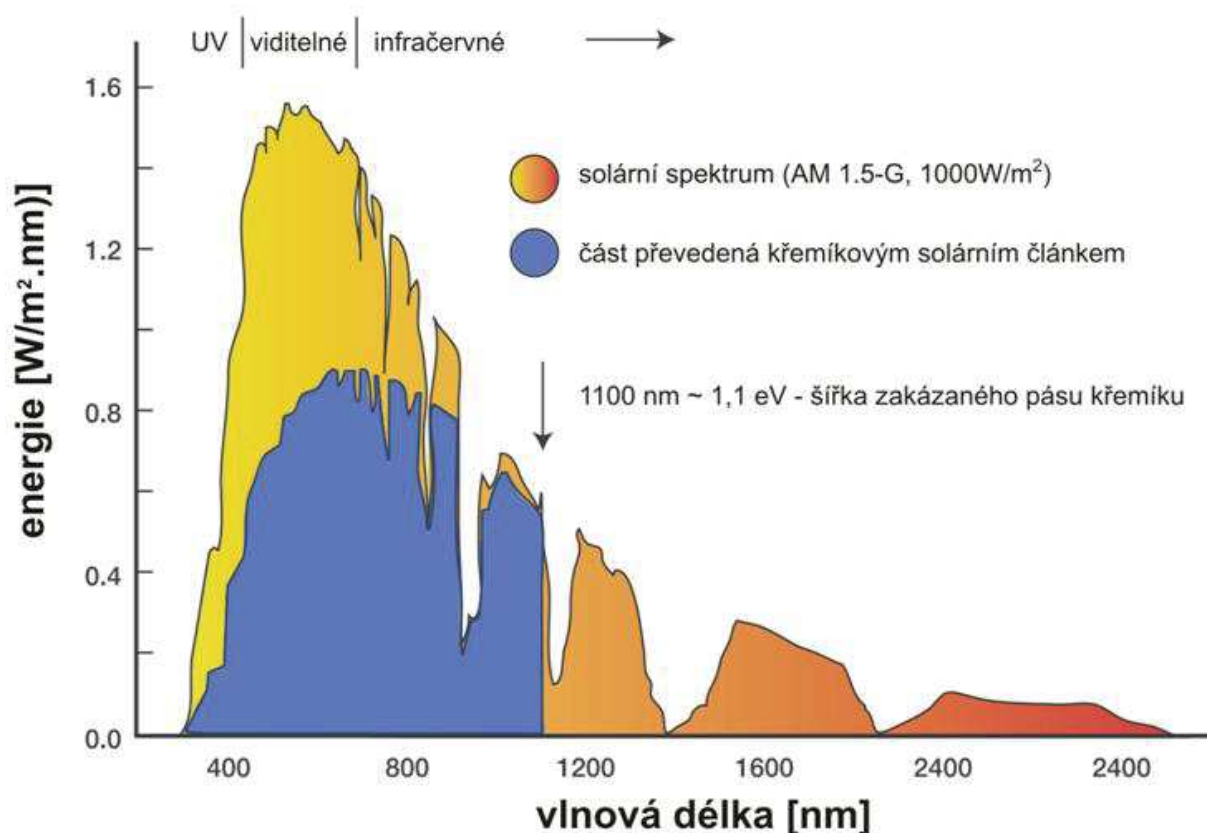
### 2.3.3 Konstrukce fotovoltaických článků

Solární články jsou dosti křehké a metalizace kontaktů by na vnějším prostředí podléhala korozi, proto jsou z nich sestavovány solární moduly. Dalším důvodem sdružování solárních článků do solárních panelů je usnadnění manipulace při montáži fotovoltaických systémů. Články jsou sériově elektricky spojeny tak, aby napětí panelu umožnilo přímé využití dodávané elektrické energie. Konstrukce solárních modulů jsou značně rozmanité. Panel musí zajistit hermetické zapouzdření solárních článků. Důležitou vlastností fotovoltaických modulů je jejich dostatečná mechanická pevnost a odolnost. Moduly jsou vystaveny mnohdy drsným klimatickým podmínkám. V zimních měsících může docházet k rychlým a velikým teplotním změnám, což zvyšuje riziko narušení vodivých spojů na solárních článcích. Proto jsou moduly opatřeny kovovými nebo plastovými rámy pro zpevnění konstrukce fotovoltaického modulu. Přední krycí materiál musí odolávat silnému krupobití. Je-li použito sklo, musí být kalené. Pospojované solární články jsou umístěny mezi dvě skla a zatěsněny. Přidáním dalšího skla vznikne tepelně-izolační solární modul do zavěšené fasády. Časté jsou i konstrukce se sklem z přední strany a nalamínovanou folií případně zalitím do průhledné hmoty ze strany zadní. Zadní strana panelu může být tvořena i plechovou či eternitovou nosnou deskou. Panely mohou být vsazeny do pevného hliníkového rámu. Připojení panelu do systému se provádí ve vodotěsné instalační krabici na zadní straně, případně kabelem, který je součástí panelu. Od výše popsané



konstrukce se neliší většina standardních panelů, které jsou sestaveny z 36 až 96 článků a jejich jmenovité napětí je 12 V. [6]

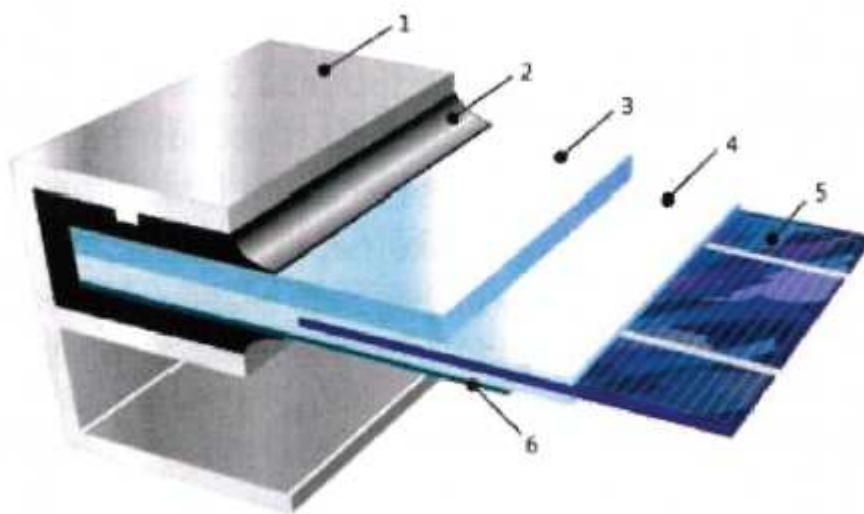
Nejvyužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík (Si). Vzhledem k šířce zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů dopadajícím slunečním zářením. Zároveň u křemíku jako základního materiálu pro mikroelektroniku se podařilo velmi dobře zvládnout všechny technologické operace potřebné k vytváření struktur. Využitelné spektrum slunečního záření křemíkovým článkem je na Obr. 2-10.



**Obr. 2-10: Využitelné spektrum záření pro články Si [3]**

Příklad konstrukce fotovoltaického článku z krystalického křemíku je na Obr. 2-11. Fotovoltaické články se vkládají do etylvinylacetátové fólie (EVA). Přední stranu článku tvoří vysoce průhledné, speciálně tvrzené sklo, aby byly články chráněny před vlhkostí, větrem, krupobitím (kroupy do průměru 25 mm) a dalšími povětrnostními vlivy. Současně má sklo propouštět na článek co největší množství slunečního záření. Zadní strana je uzavřena vícevrstvou plastovou fólií s vysokou pevností nebo další skleněnou vrstvou. Moduly jsou

opatřeny hliníkovým rámem pro uchycení k nosným konstrukcím a na zadní stěně jsou opatřeny svorkovnicí s kabelovými vývody a překlenovacími diodami.



1. hliníkový rám, 2. těsnění, 3. tvrzené sklo, 4. EVA, 5. fotovoltaický článek, 6. krycí fólie (tedlar)

Obr. 2-11: Struktura fotovoltaického modulu z Si [3]

## 2.4 Koncentrátorové fotovoltaické systémy

Fotovoltaické koncentrátorové systémy používají čočky či zrcadla ke koncentrování slunečních paprsků na FV články. Důvodem k tomuto řešení je snížení velikosti článku k dosažení požadovaného výkonu čili nahrazení drahého materiálu nutného k výrobě polovodičového článku za levnější materiál k výrobě optického členu. Díky tomuto lze sáhnout k výkonnějším FV článkům, jež by byly bez použití koncentrátoru příliš drahé v poměru ke generovanému výkonu. Ve výsledku je možno lehce dosáhnout účinnosti konverze energie přes 20% s tím, že nejvyšší dosud dosažená účinnost je přes 40% (oproti cca 32% bez koncentrace u stejného článku). Navzdory jednoduchému principu se ukázalo masové praktické provedení obtížnější, ačkoliv se tímto směrem provádí výzkum od samého počátku zkoumání fotovoltaiky. Hlavní technické problémy pramení z náročných požadavků na samotné umístění článků do modulu, a to z důvodů velkého tepelného toku a proudového zatížení a potřeby ekonomicky výhodnějších a hlavně spolehlivějších sledovacích systémů. Nevýhodou koncentrátorů je ta, že mohou efektivně vyrábět energii pouze pod přímým slunečním zářením. Difúzní ozáření se na produkci energie prakticky nepodílí, proto je jejich použití v místech s nízkými úhrny přímého ozáření méně výhodné. Další nevýhodou tohoto systému je velké zahřívání panelu vlivem zesíleného záření. Toto vzniklé teplo musí být

odváděno, aby nedošlo nejen ke zničení panelu, ale také proto, že s rostoucí teplotou klesá účinnost panelu. Teplo nesmí přesáhnout cca 80°C, jinak by účinnost klesla natolik, že by zkoncentrování záření ztratilo smysl a panel by místo zvýšeného výkonu naopak vykazoval ztrátu na nákladech nutných pro jeho chlazení.

Hlavní překážky uplatnění na trhu jsou především ekonomického charakteru; koncentrátoři byly zamýšleny k výrobě velkého množství neznečišťující obnovitelné energie, avšak finanční náklady nemohou ani v dnešní době bez dotací konkurovat energii z fosilních zdrojů či nejbližšímu konkurentovi – větrné energii. Cenový rozdíl se zmenšuje, ale je zřejmé, že až vzrůstající náklady na energii z fosilních zdrojů a větší tlak na rozšíření neznečišťujících zdrojů energie může vést k masovějšímu použití FV koncentrátorů potažmo fotovoltaiky.

Použití koncentrátorů se však nemusí omezovat pouze na velké elektrárny, využití se dá nalézt i v jiných než masových aplikacích. První variantou jsou místa, kde je zavedení elektrické sítě buď nemožné anebo ekonomicky nevýhodné, avšak elektřina je nutná pro chod zařízení – jsou to tedy odlehlá vědecká či výzkumná pracoviště, odlehlá lidská sídla či námořní lodě. Druhou variantou využití jsou místa, kde jsou omezené prostory pro instalaci tradiční fotovoltaiky a použití koncentrátorů může přinést vyšší energetickou produkci při zachování velikosti plochy zastavěné FV elektrárnou. [12]



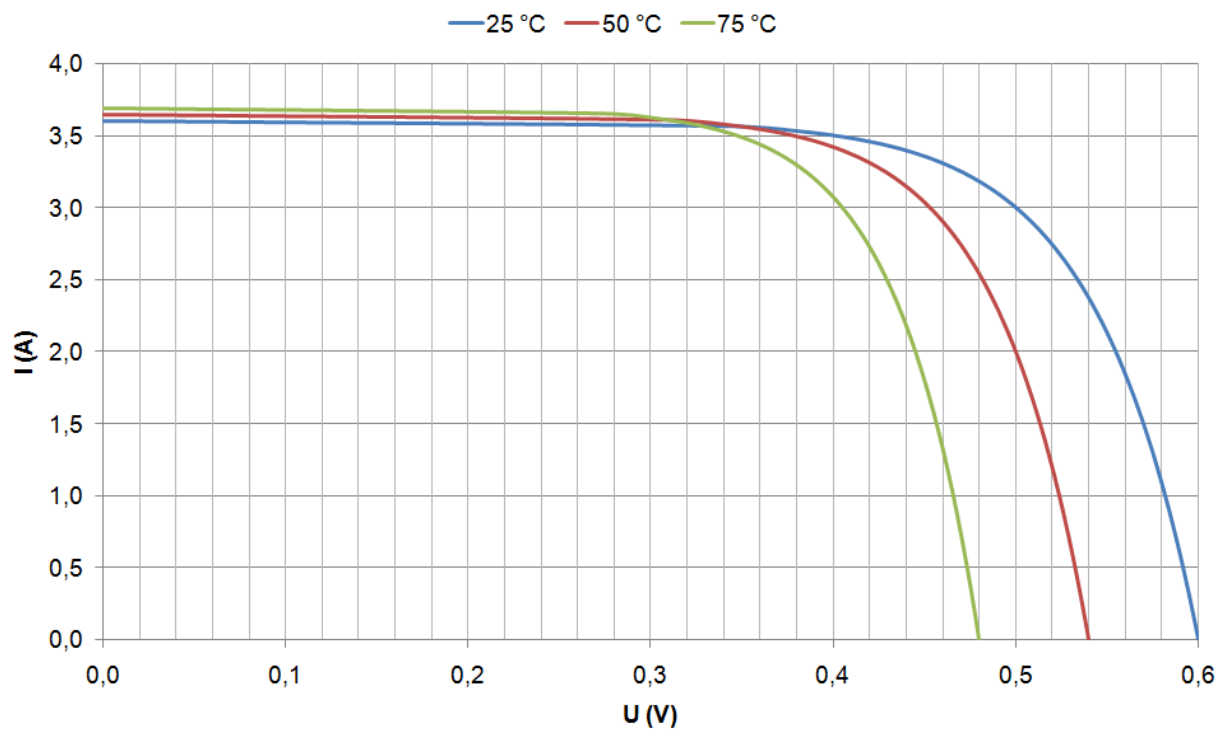
**Obr. 2-12: Hybridní solární elektrárna na Floridě [9]**



**Obr. 2-13: Příklad koncentrátorového fotovoltaického systému [13]**

### **2.4.1 Vliv teploty na fotovoltaický článek**

Na polohu pracovního bodu má výrazný vliv teplota. Při déle trvající sluneční intenzitě nebo zhoršených podmínkách chlazení článku (bezvětrí), kdy teplota vzduchu dosahuje až 40 °C, dochází ke zvýšení povrchové teploty FV článku až na 80 °C. Při takto vysokých teplotách dochází ke změně elektrických vlastností článku, která vede ke snížení svorkového napětí FV článku na zatěžovací charakteristice. Pokles svorkového napětí způsobí snížení dodávaného výkonu do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě při největší sluneční intenzitě, můžeme ztratit popř. až 75 % z dosažitelné denní výroby FV článku. [11]



**Obr. 2-14: Vliv teploty na VA charakteristiku FV článku [11]**

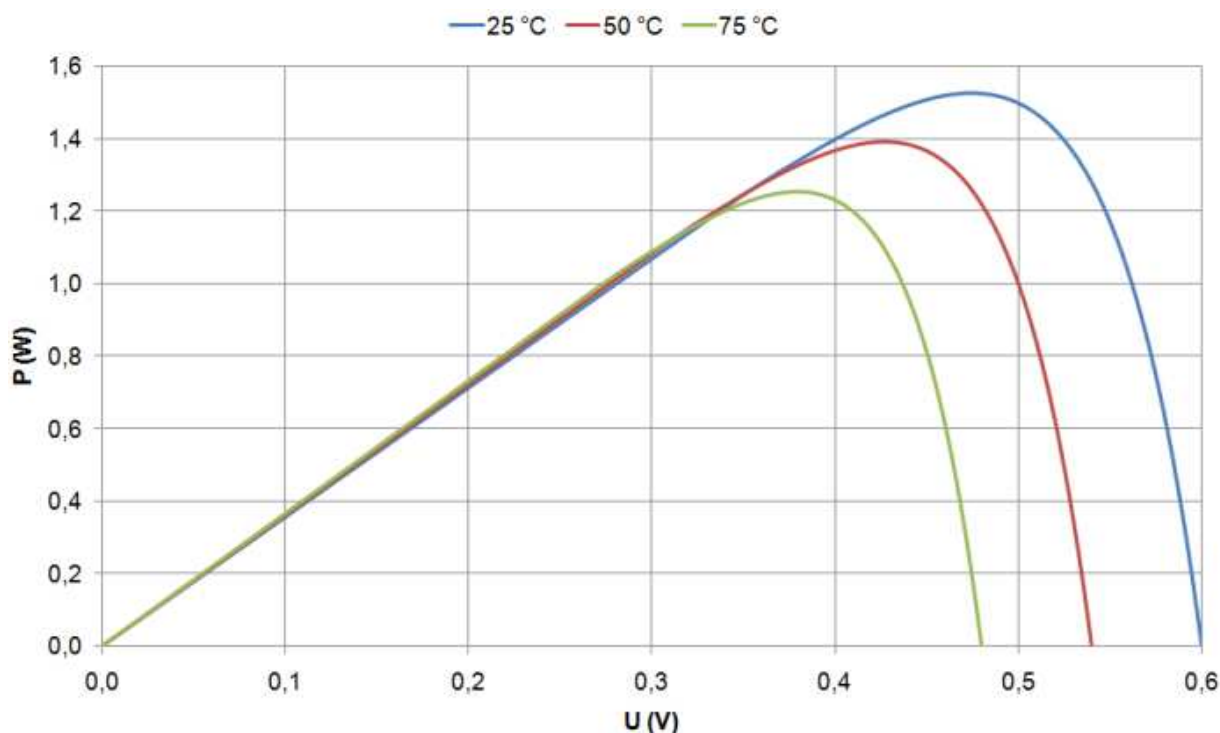
Teplota má výrazný vliv na polohu pracovního bodu. Při vysokých teplotách dochází ke změně elektrických vlastností článku, která vede ke snížení svorkového napětí a pokles svorkového napětí způsobí snížení dodávaného výkonu do zátěže Obr. 2-14 a Obr. 2-15. [11]

V případě, že použijeme obyčejný solární článek, který je vyroben z krystalického křemíku a použijeme ho jako koncentrátorový systém, tak při únosné koncentraci 10 sluncí se účinnost zvýší zhruba o 10%. Pokud bychom koncentraci zvýšili ještě více (například 30 sluncí), tak se potýkáme s prudce rostoucími odporovými ztrátami a účinnost se snižuje. Zvyšování koncentrace má také za následek zvýšení proudové hustoty a tím také zvýšení teploty samotného solárního článku. Pokud bychom chtěli jít cestou zvyšování koncentrace a také díky vyšší koncentraci dosahovat vyšší účinnosti, museli bychom využít speciální články. [9]

Dělení solárních článků:

- nízká koncentrace od 2 do 100 sluncí,
- střední koncentrace od 100 do 300 sluncí,
- vysoká koncentrace nad 300 sluncí.





Obr. 2-15: Vliv teploty na P charakteristiku FV článku [11]

## 2.5 Zhodnocení fotovoltaiky

Světová energetika se řítí směrem ke stále vyšší spotřebě. Klasické energetické zdroje nebudou schopny dlouhodobě krýt nároky populace. Jednou z mála účinných alternativ je zvýšení podílu alternativních zdrojů. Od fotovoltaiky se očekává, že se už během relativně krátké doby, tj. 20 až 50 let, stane viditelným a významným zdrojem nejčistší formy energie, elektřiny. Cestou k tomu bude instalace fotovoltaických solárních systémů na venkově (zejména v rozvojových zemích) a fotovoltaika integrovaná do stěn a střech budov. [6]

### 2.5.1 Finanční náročnost

Ekonomické posuzování fotovoltaických systémů (FVS) je ovlivněno několika důležitými faktory.

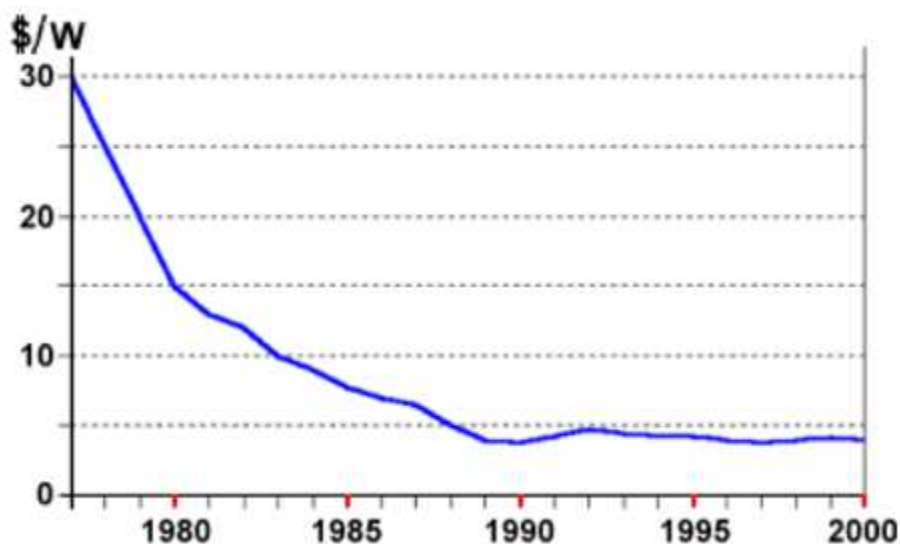
Doba návratnosti je ovlivněna dostupností slunečního záření v dané lokalitě. Na území ČR nejsou rozdíly příliš velké, nicméně z celosvětového hlediska jsou některé oblasti zvýhodněny faktorem 2 až 3 – Arizona, africké pouště, Austrálie atd.

Cena samotného systému je klíčovým faktorem. Náklady na pořízení FV systému zahrnují cenu solárních panelů (až 60 %), elektrotechnická zařízení a instalace – střídače,

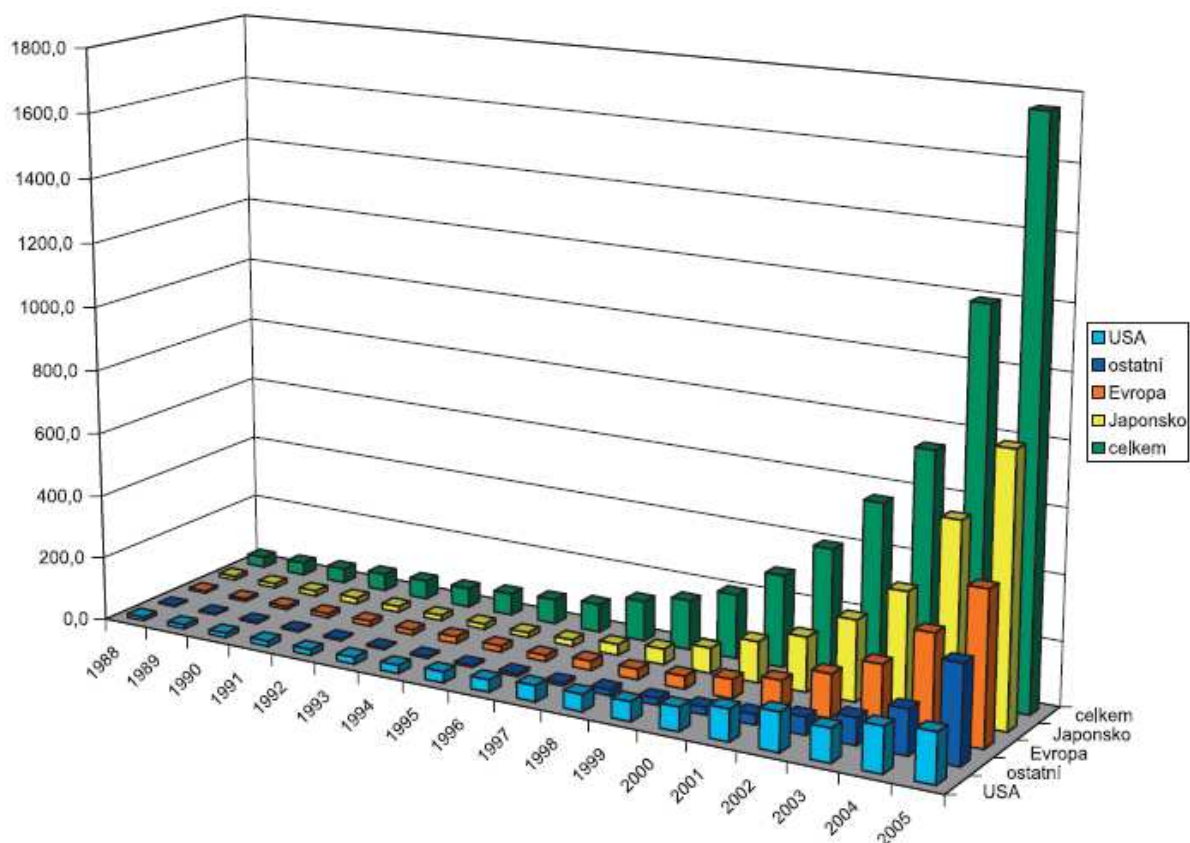
baterie, regulátory, jističí prvky, vodiče a konstrukci. Dále jsou zahrnuty náklady spojené s konstrukčním a architektonickým návrhem a se samotnou instalací systému. V průběhu provozu se pak mohou objevit další náklady spojené se servisem případně připojovací náklady. Současné náklady na instalaci solárního systému v Evropě se pohybují od 6 do 12 € na instalovaný watt v závislosti na velikosti trhu. Pokud je financování systému uskutečněno prostřednictvím půjčky, připočítávají se k celkové ceně systému i úroky.

Cena energie získané ze systému do značné míry závisí také na účinnosti fotovoltaického systému a na účinnosti solárních článků při nízkých intenzitách osvětlení. Nezbytným předpokladem návratnosti systému je jeho dlouhá životnost a dlouhodobě stabilní parametry. Zatímco výrobci deklarovaná životnost solárních panelů se pohybuje od 15 do 30 let, tak garance na střídače a jiné komponenty je maximálně dva roky. Předpokládaná životnost u akumulátorových baterií je 3 až 5 let a u střídačů a kontrolní elektroniky 5 až 10 let.

Do konečné ceny solární energie se promítne významnou měrou i způsob instalace. Solární panely představují prvek, který nezapadá do konstrukce budovy, a je nutné počítat s plnými náklady. Příkladem jsou střešní instalace nad stávající střešní krytinou. Náklady lze snížit u novostaveb nebo při rekonstrukci budov v případě, že jsou solární panely součástí některé části stavební konstrukce – solární střešní krytina, solární fasádní panely.



Obr. 2-16: Pokles ceny fotovoltaických modulů [10]



Obr. 2-17: Vývoj roční produkce solárních panelů v MW celosvětově a v jednotlivých regionech [14]

## 2.5.2 Klady a zápory

Ve srovnání s jinými zdroji elektrické energie má provoz fotovoltaického zařízení celou řadu ekologických i provozních výhod. V našich klimatických podmínkách je však třeba počítat i s nevýhodami, které mohou omezit nebo zcela znemožnit efektivní využití fotovoltaických zařízení.

### Výhody

- Používá se prakticky nevyčerpatelný zdroj energie.
- Při provozu nevznikají žádné emise nebo jiné škodlivé látky.
- Provoz je zcela bezhlučný, bez pohyblivých dílů.
- Jednoduchá instalace solárního systému
- Provoz zařízení prakticky nevyžaduje obsluhu, snadná elektronická regulace. Zařízení mají vysokou provozní spolehlivost.



## **Nevýhody**

- Poměrně nízká průměrná roční intenzita slunečního záření.
- Krátká průměrná roční doba slunečního svitu.
- Velké kolísání intenzity záření v průběhu roku.
- Malá účinnost přeměny a z toho plynoucí nároky na plochu článků.
- Vysoké investiční náklady na instalaci.
- Poměrně malá životnost (20 let) v poměru k ceně. Potřeba záložního zdroje elektřiny.

Z porovnáním výhod a nevýhod vyplývá, že fotovoltaické zdroje u nás mají smysluplné využití především v místech bez možnosti připojení k rozvodné síti, případně jako doplňkový zdroj malého výkonu. [10]

### 3 Přenos tepla a proudění

Sdílením tepla se nazývá přenos energie z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s teplotou nižší. To je dáno platností druhého zákona termodynamiky. Děj může záviset na čase, pak hovoříme o **nestacionárním** přenosu tepla, nebo děj může být nezávislý na čase, tedy **stacionární** přenos tepla. Teplota se v materiálu mění ve všech směrech. Nárůst teploty je dán gradientem teploty, což je vektor, kolmý k izotermě a směřující na stranu nárůstu teploty,

$$\text{grad}T = \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} = \nabla T \quad (\text{K.m}^{-1}) \quad (6)$$

**Tepelný tok – tepelný výkon Q** představuje množství tepelné energie přenesené za jednotku času a je definován vztahem:

$$Q = \frac{dQ}{d\tau} \quad (\text{J}) \quad (7)$$

**Hustota tepelného toku q** vyjadřuje tepelný tok vztažený k jednotce plochy a je definována vztahem:

$$q = \frac{dQ}{dS} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (8)$$

Teplu, jakožto forma energie, může být přenášeno 3 základními způsoby:

- kondukcí (vedením),
- konvekcí (prouděním),
- radiací (sáláním).

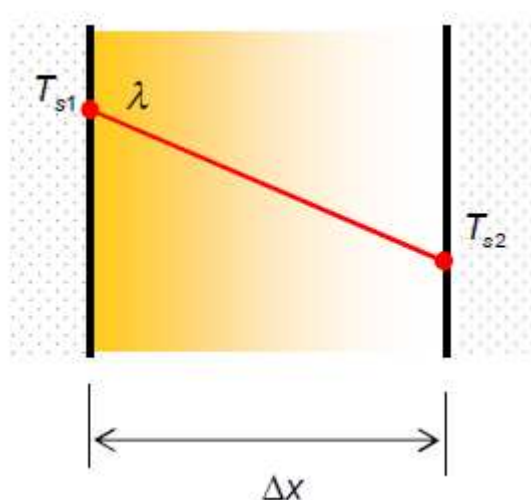
Celá kapitola čerpá z [9], [10], [15], [16], [17], [20].

#### 3.1 Sdílení tepla vedením

Sdílení tepla kondukcí (vedením) vzniká v důsledku pohybu strukturních částic hmoty (molekul). V čisté formě existuje pouze u látek pevného skupenství. V tekutinách existuje pouze za předpokladu, že je vliv pohybu tekutiny na přenos tepla zanedbatelný (tj. že se nejedná o přenos tepla konvekcí). Ve všech ostatních případech přispívá k přenosu tepla i

konvekce nebo dokonce konvekce spolu s radiací. Při většině inženýrských úloh do fyzikálního děje vstupují všechny tři způsoby sdílení tepla.

Nejčastěji je tento fyzikální děj demonstrován na jednoduchém příkladu vedení tepla homogenní nekonečnou stěnou o určité tloušťce tvořenou konkrétním materiálem. V oblasti sdílení tepla kondukcí (vedením) se ještě rozlišují dva dílčí pojmy. Prvním z nich je pojem „vedení tepla“ stěnou, který vyjadřuje situaci, kdy jsou pro výpočet zadány obě povrchové teploty stěny, viz Obr. 3-1. Druhým pojmem je pak „prostup tepla“ stěnou, o kterém hovoříme, pokud jsou pro výpočet zadány teploty obou médií (tekutin), jež stěnu z obou stran obklopují a které se mohou také pohybovat.



Obr. 3-1: Princip vedení tepla stěnou

Základním zákonem vedení tepla je Fourierův zákon, který udává vztah **mezi hustotou tepelného toku**  $q$  a teplotním gradientem  $\text{grad}T$  :

$$q = -\lambda * \text{grad}T \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (9)$$

kde  $\lambda$  je tepelná vodivost, která závisí na druhu materiálu a mění se s teplotou. Záporné znaménko na pravé straně rovnice vyjadřuje skutečnost, že hustota tepelného toku a teplotní gradient mají jako vektory opačný smysl (teplo se šíří ve směru klesající teploty). Nejjednodušším případem vedení tepla je stacionární vedení tepla homogenní neomezenou izotropní rovinnou stěnou (viz Obr. 3-1), tj. stěnou, která je materiálově stejnorodá a teplo se v ní šíří ve všech směrech stejným způsobem. Pro výpočet hustoty tepelného toku v tomto případě platí základní vztah:

$$q = -\lambda * \frac{T_{S1} - T_{S2}}{\Delta x} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (10)$$

kde  $T_{S1}$  a  $T_{S2}$  představuje teploty na stěnách a  $\Delta x$  je tloušťkou stěny. Obdobný princip lze aplikovat u tzv. stěny složené, která se skládá z několika vrstev o různém materiálu. Tento postup se provede pro každou dílčí vrstvu zvlášť.

Nejjednodušším případem prostupu tepla je stacionární prostup tepla homogenní neomezenou izotropní rovinnou stěnou (viz Obr. 3-1). Podmínkou je, aby se tekutina obklopující stěnu z obou stran (viz výše uvedený výklad) se výrazněji nepohybovala a nedocházelo tak ke sdílení tepla prouděním. Pro výpočet hustoty tepelného toku v tomto případě platí základní vztah:

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} * (T_1 - T_2) \quad (\text{W.m}^{-2}), \quad (11)$$

kde  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  představuje součinitele přestupu tepla na rozhraní stěn a tekutiny,  $T_1$  a  $T_2$  představují teploty obou stěn obklopujících tekutin a  $\Delta x$  je tloušťkou stěny. Na rozdíl od případu vedení tepla nelze stejný postup uplatnit u stěn složených.

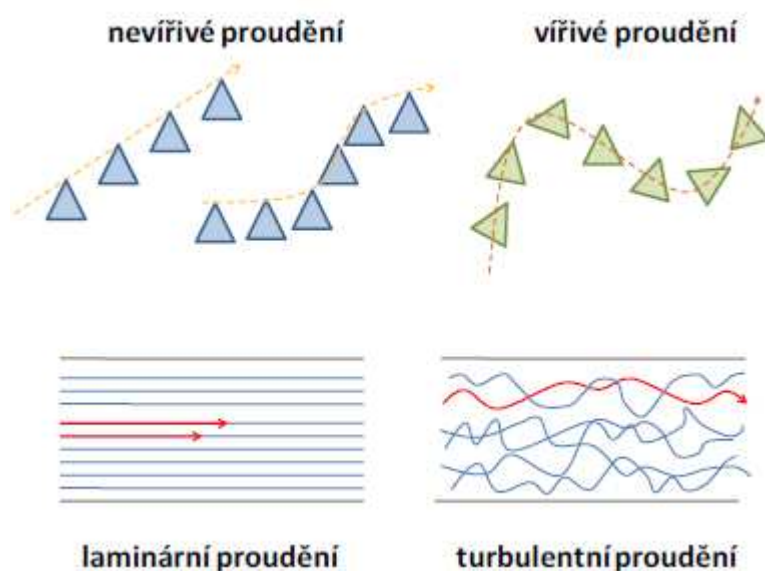
### 3.2 Konvekce a hydrodynamika

Sdílení tepla konvekcí (prouděním) je na rozdíl od kondukce spjata s pohybem tekutiny okolo nebo podél stěny, jíž teplo prochází. Opět, stejně jako v případě kondukce, neexistuje v praxi nikdy ve zcela čisté podobě, protože uvnitř proudící tekutiny stejně jako na rozhraní tekutiny a pevné stěny je vždy doprovázeno kondukcí. Výpočet přenosu tepla je však oproti případu kondukce ztížen faktem, že je třeba do něj zakomponovat kromě rovnic z oblasti sdílení tepla ještě rovnice z oblasti hydrodynamiky.

#### Dynamika tekutin:

Hydrodynamika se zabývá prouděním tekutiny a stanovuje vzájemné závislosti mezi pohybem tekutiny a časem (kinematika) a rovněž i vzájemné působení sil v proudící tekutině (dynamika).

U proudění skutečných tekutin může probíhat **laminární proudění** – částice se pohybují ve vrstvách (deskách), aniž se přemísťují po průřezu. Nebo **turbulentní proudění** – částice mají kromě střední (postupné) rychlosti ještě rychlost flukтуаční (turbulentní), jíž se přemísťují po průřezu, viz Obr. 3-2.



Obr. 3-2: Typy proudění

Při turbulentním proudění částice tekutiny mají větší rychlost, než při laminárním proudění. Dochází tak k pohybu částic tekutiny ve všech směrech. Částice následkem pohybů přecházejí z jedné vrstvy do druhé, přičemž dochází k výměně kinetické energie a rychlosti částic se po průřezu vyrovnávají (netvoří v řezu parabolu). Rychlostní profil se v řezu blíží obdélníku čím více, čím je větší rychlost proudění, tedy turbulentní proudění je taktéž závislé na **Reynoldsově kritériu**.

Proudění tekutiny se jeví jako chaotické, mění se fyzikální vlastnosti látky (např. viskozita). Může mít charakter pulsů, vírů, shluků tekutiny, při kterých fyzikální děje (např. sdílení tepla, difúze apod.) mohou být silně ovlivněny a může dojít až ke ztrátám energie. Proudění tekutiny je charakterizováno rychlostí, ovšem určit rychlost turbulentního proudu není jednoduché. V každém okamžiku a místě může být rychlost různá.

**Reynoldsovo kritérium (Re)** patří mezi základní kritéria při proudění tekutiny. Je to bezrozměrné číslo, které je dáno poměrem sil setrvačných a vazkých. Tyto síly mají největší vliv při proudění skutečných tekutin. Vyjádření Reynoldsova kritéria je dáno poměrem těchto sil,

které jsou vyjádřeny rovnicí:

$$\frac{F_s}{F_t} = \frac{m * a}{\tau * S} = \frac{m * \frac{\Delta v}{\Delta \tau}}{\eta * \frac{\Delta v}{\Delta y} * S} = \frac{Q_m * \Delta v}{\eta * \frac{\Delta v}{\Delta y} * S} = \frac{\rho * S * v * \Delta v}{\eta * \frac{\Delta v}{\Delta y} * S} = \frac{\rho * l^2 * v^2}{\eta * l * v} = \frac{v * l}{\frac{\eta}{\rho}} = \frac{v * l}{\nu} = Re \quad (12)$$

kde  $l$  je charakteristický rozměr, pro kruhové potrubí je dán průměrem  $d$ , pro nekruhová potrubí je dán výrazem  $d_h$ , neboli *hydraulickým průměrem*:

$$d_h = \frac{4 * S}{o} \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

kde  $S$  je průtočný průřez zaplněný tekutinou a  $o$  je obvod zaplněné tekutiny. Dle Reynoldsova kritéria, jeho číselné hodnoty, rozlišujeme zda-li se jedná o proudění laminární, nebo turbulentní. Pro laminární proudění platí  $Re < 2300$ , pro turbulentní  $Re > 10\,000$ . Oblast, kdy  $Re = 2300$  až  $10\,000$  se nazývá *oblastí přechodovou* a kritérium má tzv. *kritické hodnoty* a označuje se jako  $Re_{kr}$ .

### Fourierova – Kirchhoffova rovnice

Tato rovnice popisuje teplotní pole proudící tekutiny. Předpokládá se proudění tekutiny homogenní, izotropní, s konstantními fyzikálními vlastnostmi a s rovnoměrně rozprostřenými vnitřními objemovými zdroji.

Vycházíme z 1. Fourierova zákona vedení tepla v tuhém tělese. Jelikož se jedná o pohybující se vedení tepla je potřeba k vektoru  $q$  přidat teplo, které tekutina o rychlosti  $v$ , hustotě  $\rho$  a měrné entalpii přenesla přes jednotku plochy za jednotku času.

$$q = -\lambda * gradT + \rho * v * i \quad (\text{W} * \text{m}^{-2}) \quad (14)$$

Za předpokladu, že  $\rho$ ,  $\lambda$  jsou konstanty, po dosažení do složek  $x$ ,  $y$ ,  $z$  do rovnice dostaneme:

$$q\rho * \frac{\partial_i}{\partial \tau} = divq + q_v \quad (\text{W} * \text{m}^{-3}) \quad (15)$$

Rovnice nabude ve tvaru:

$$\rho * \frac{\partial i}{\partial \tau} = \lambda * \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) - \rho * \left( v_x * \frac{\partial i}{\partial x} + v_y * \frac{\partial i}{\partial y} + v_z * \frac{\partial i}{\partial z} \right) - \rho * i \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + q_v \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$$

(16)

Pro nestlačitelné tekutiny platí  $\rho = \text{konst}$ :

$$\left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{s}^{-1})$$

(17)

Pak se vztah (16) zjednoduší na:

$$\rho * \left( \frac{\partial i}{\partial \tau} + v_x * \frac{\partial i}{\partial x} + v_y * \frac{\partial i}{\partial y} + v_z * \frac{\partial i}{\partial z} \right) = \lambda * \nabla^2 t + q_v \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$$

(18)

U izobarického děje platí  $d_i = c_p \cdot d_t$ , takže vztah (18) přejde na tvar:

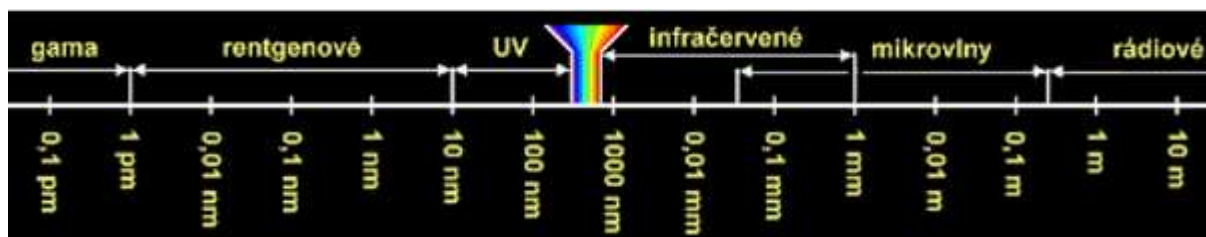
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_x * \frac{\partial t}{\partial x} + v_y * \frac{\partial t}{\partial y} + v_z * \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha * \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p} * \rho \quad (\text{K} \cdot \text{s}^{-1})$$

(19)

Pokud by složky  $v_x = v_y = v_z = 0$  jedná se opět o Fourierovou rovnici vedení tepla v tuhých tělesech.

### 3.3 Sdílení tepla zářením (radiací)

Sdílení tepla radiací spočívá ve vysílání elektromagnetického záření a jeho následném pohlcování, které vede ke zvýšení vnitřní energie v látce, která záření absorbuje. Tento typ radiace je specifický tím, že k přenosu tepla nepotřebuje zprostředkující látku. Elektromagnetické záření se ve vakuu šíří rychlostí světla, tj. rychlostí 300 000 km/s. Jednotlivé druhy elektromagnetického záření (Obr. 3-3):



Obr. 3-3: Rozložení spektra záření [10]

### Rádiové vlny

Slouží k přenosu rozhlasového a televizního signálu. Zdrojem těchto vln je anténa vysílače. První rádiové vysílání se uskutečnilo koncem 19. století, televize se rozšířila po 2. světové válce.

Vlnová délka: 2 000 m - 0,1 m

Energie fotonů:  $6,2 \cdot 10^{-10}$  -  $1,24 \cdot 10^{-5}$  eV

### Mikrovlny

Mikrovlnné signály využívají radary, mobilní telefony, přístroje GPS. Tepelnými účinky mikrovln se zahřívají potraviny v mikrovlnné troubě.

Vlnová délka: 0,1 m - 0,1 mm

Energie fotonů:  $1,24 \cdot 10^{-5}$  -  $1,24 \cdot 10^{-2}$  eV

### Infračervené záření – tepelné záření

Je vyzařováno rozžhavenými tělesy. Záření je pro nás neviditelné a vnímáme ho jako tepelné záření (sálání) tepelných zdrojů. Infračervené záření je součástí slunečního záření.

Vlnová délka: 0,1 mm - 790 nm

Energie fotonů: 0,0124 - 1,57 eV

### Viditelné světlo – tepelné záření

Jediný druh elektromagnetického záření, který přímo vnímáme zrakem. Bílé světlo je možno skleněným hranolem nebo optickou mřížkou rozložit podle vlnových délek na jednotlivé spektrální barvy. Viditelné světlo je významnou složkou slunečního záření, dopadajícího na zemský povrch.

Vlnová délka: 790 nm - 390 nm

Energie fotonů: 1,57 - 3,18 eV



### **Ultrafialové záření – tepelné záření**

Slunce je přírodním zdrojem ultrafialového záření, většina je ho však zadržena zemskou atmosférou. Zdrojem jsou i výbojové trubice, ve kterých vzniká záření průchodem elektrického proudu rtuťovými parami.

Vlnová délka: 390 nm - 10 nm

Energie fotonů: 3,18 - 124 eV

### **Rentgenové záření**

Fotony rentgenového záření mají velkou energii a proto má toto záření značnou pronikavost. Zemská atmosféra sluneční rentgenové záření nepropouští.

Vlnová délka: 10 nm - 1 pm

Energie fotonů:  $1,24 \cdot 10^2$  -  $1,24 \cdot 10^6$  eV

### **Záření gama**

Radioaktivní záření, které vzniká při jaderných reakcích v jádrech izotopů některých prvků. Vyznačuje se velkou pronikavostí a ionizačními účinky.

Vlnová délka: menší než 1 pm

Energie fotonů: větší než  $1,24 \cdot 10^6$  eV

Světlo má vlnově – částicovou povahu (dualismus světla). Podle toho rozlišujeme dvě teorie chování světla:

#### **Vlnová teorie**

Za jistých okolností lze světlo popsat klasickou elektromagnetickou teorií (vlnovou/Maxwellovou), tedy šíření světla, lom světla, odraz, ohyb apod. Světlo se řídí zákony vlnové optiky, má tedy charakter vlny a rychlost světla lze matematicky vyjádřit jako součin frekvence a vlnové délky.

$$c = f \cdot \lambda \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad (20)$$

#### **Kvantová teorie.**

Jedná se o interakci světla s látkou. Světlo je elektromagnetické vlnění v rozmezí vlnových délek 390 až 760 nm. Tato teorie zavádí pojem energetického kvanta, které je atomy vyzařováno nebo pohlcováno. Max Planck vyslovil předpoklad, že záření vydávané nebo pohlcované nemůže mít libovolnou energii, ale vždy je vyzařováno nebo pohlcováno v určitých dávkách – kvantech [5]. Energie záření je úměrná frekvenci  $f$  a konstantě úměrnosti  $h$  [6].

$$Q = h^* f \quad (J) \quad (21)$$

Tyto kvanta se nazývají fotony. Fotony se chovají jako částice s hmotností  $m = \frac{h^* f}{c^2}$ , hybností  $\frac{h^* f}{c}$ , jejich klidová hmotnost je nulová. Čím kratší vlnovou délku má elektromagnetická vlna, tím výraznější částicové (kvantové) chování u ní pozorujeme.

### 3.4 Základní rovnice popisující proudění

Pro řešení zadání je použit profesionální program SolidWorks Flow Simulation, který řeší systém následujících tří parciálních diferenciálních rovnic, doplněný stavovou rovnicí. Jde o trojrozměrný typ proudění stlačitelné, vazké tekutiny s přívodem tepla.

Základní rovnice popisující proudění vazké, stlačitelné tekutiny v karteziánské souřadné soustavě zapsané v konzervativním tvaru jsou tři zákony zachování, a to zákon zachování hmotnosti, zákon zachování pohybu a zákon zachování energie doplněné čtvrtou rovnicí, a to rovnicí stavu uvažované tekutiny.

Rovnice spojitosti, vyjadřující zákon zachování hmotnosti, který má tvar:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad \text{složka } i=1, 2, 3 \quad (22)$$

Stokes – Navierova rovnice, vyjadřující aplikovanou Newtonovu větu o změně hybnosti, ve tvaru:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad \text{index } j=1, 2, 3 \quad (23)$$

Rovnice energie, vyjadřující zákon zachování energii pro stlačitelnou tekutinu, nabývá tvaru:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} (E + p) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right] + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, E = e + \frac{v^2}{2} \quad (24)$$

Rovnice stavu, vzájemí určovací veličiny stavu tekutiny, pro uvažovaný ideální plyn, ve tvaru:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (\text{kg.m}^{-3}) \quad (25)$$

Kde  $u$ , je rychlost tekutiny,  $p$  je tlak tekutiny,  $\rho$  je hustota tekutiny,  $T$  je teplota tekutiny,  $e$  je vnitřní energie,  $S_i$  jsou vnější hmotnostní síly působící na jednotku hmotnosti (kupř. tíhová, odstředivá),  $Q_H$  je přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu,  $q_i$  je difusní tok tepla,  $\tau_{ij}$  je tensor vazkých napětí a  $ij$  jsou indexy u veličin udávající sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace).

### 3.5 Okrajové a počáteční podmínky řešení

Pro řešení parciální diferenciální rovnice s proměnnou  $\zeta$  je potřebné znát počáteční a okrajové podmínky řešení proměnné.

Základní okrajové podmínky proudění mohou být různého typu.

- Podmínky pro vstup a výstup proudu – lze je definovat pomocí tlaku nebo rychlosti. Speciální výstup se často definuje pomocí podmínek prvního druhu, tj. derivace podle normály je rovna nule (nulový normálový gradient).
- Podmínky na stěně – stěna může být nepohyblivá nebo pohyblivá (např. rotující nebo klouzající, se třením nebo bez tření, hladká nebo drsná).
- Podmínky symetrie – nulová normálová rychlost a nulové normálové gradienty všech hledaných veličin.
- Podmínky periodické (cyklické) – používají se v případě, kdy se opakují proudové útvary, mohou být rotačního typu a translačního typu, kdy se umožňuje definování tlakového spádu ve směru proudící tekutiny po celé délce oblasti.
- Všechny typy podmínek mohou být časově závislé, pokud to vyžaduje jejich charakter.

Další okrajové podmínky se netýkají proudění jako takového, ale dalších veličin vyplývajících ze složitosti matematického modelu, jako je skalární veličina teplota, teplotní toky, radiace, hmotnostní zlomky (resp. molové zlomky) příměsí apod.

## 4 Použitý software

### 4.1 SolidWorks

SolidWorks je parametrický 3D modelář nabízející výkonné objemové i plošné modelování postavené na jádře Parasolid®, byl vytvořený přímo pro Windows (Vista, XP, 2000, NT příp. Windows ME), tzn. využívá všech dostupných procedur systému. Otevřená architektura umožňuje rozšiřovat program o další funkce s využitím např. Visual Basic. Plně podporuje komunikaci prostřednictvím standardu Microsoftu OLE 2. Vzhledem ke komunikačním technologiím Windows (datové sítě, Internet) slouží SolidWorks i jako komunikační nástroj: konstruktér pracuje na sestavě, jejíž části mohou být na různých místech světa. Modelování založené na jádře Parasolid® nabízí výkonné objemové i plošné modelování s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.

Celá kapitola čerpá z [15], [16], [17], [18], [19], [20].

Mezi výhody můžeme počítat:

- komplexní řešení pro strojírenský sektor, díky mnoha pokročilým a výkonným nástrojům proniká i do 3D design, hi-tech, architektury, projekce, kreslení ve 3D,
- intuitivní, snadné a vizuálně přehledné ovládání postavené na Windows,
- 100% asociativita mezi díly, sestavami a výkresy – všechna data jsou vždy správná a aktuální,
- speciální technologie pro práci s velkými sestavami a zejména pro generování výkresů velkých sestav,
- standardně velice vysoký výkon i na běžném hardware – pro SolidWorks není potřeba pracovní stanice,
- výhodné licenční politika,
- kompletní česká lokalizace.

SolidWorks obsahuje zdarma integrované překladače pro všechny současné standardní formáty používané v oblasti CAD: CGR (CATIA® graphics), HCG (CATIA highly compressed graphics), Pro/ENGINEER®, IPT (Autodesk Inventor®), Mechanical Desktop®, Unigraphics®, PAR (SolidEdge®), CADKEY®, IGES, STEP, Parasolid®, SAT (ACIS®), VDA-FS, VRML, STL, DWG, DXF™, TIFF, JPG, PDF, Viewpoint, RealityWave, HSF

(Hoops). Modul pro inteligentní import (FeatureWorks) modelům přiděluje prvky, parametry a historii. Výkresy ve formátu AutoCAD se v SolidWorks využívají přímo včetně hladin, barev a typů čar. Stejně tak lze na výkresech SolidWorks bez převodu pokračovat v AutoCADu. Z Pro/ENGINEERa se načítají modely a sestavy s historií a všemi parametry.

SolidWorks nabízí pro zvýšení efektivity práce a zvýšení záběru působnosti celou škálu rozšiřujících modulů, nadstaveb a aplikací z nejrůznějších oborů. Rozšiřující moduly jsou dostupné v balíčcích Office Profesional a Office Premium, některé se dají dokoupit samostatně nebo se jedná o samostatně prodejné aplikace třetích stran. A některé jsou zcela zdarma.

## 4.2 SolidWorks Flow Simulation

Analýza proudění pomocí této aplikace zajišťuje spolehlivost návrhů zahrnujících proudění plynů, kapalin nebo přenos tepla (CFD). SolidWorks FloSimulation4 nabízí za přijatelnou cenu robustnost a nástroje high-end CFD systémů při současném zachování jednoduchého a intuitivního ovládání.

Na rozdíl od konkurenčních produktů SolidWorks FloSimulation kombinuje velmi pokročilou funkcionalitu s přesností a snadným používáním. Plně integrovaný do SolidWorks kombinuje vysokou úroveň funkcionality a přesnosti výpočtu s rychlým a snadným ovládáním.

## 4.3 Metoda konečných objemů

Metodu konečných objemů (MKO) využívá při výpočtu program SolidWorks Flow Simulation. MKO patří do oblasti numerických metod. Patří mezi metodu, která se hojně užívá u nejznámějších a nejvíce používaných nástrojů pro analýzu proudění tekutin. Základem je řešenou oblast rozdělit na konečný počet malých kontrolních objemů pomocí sítě a soustavy diferenciálních rovnic (kontinuity, pohybové, energie, transportní, apod.), které popisují spojitě prostředí převést na řešení soustavy rovnic algebraických. MKO je efektivní metodou v případě použití u simulací na modelech se složitou geometrií.

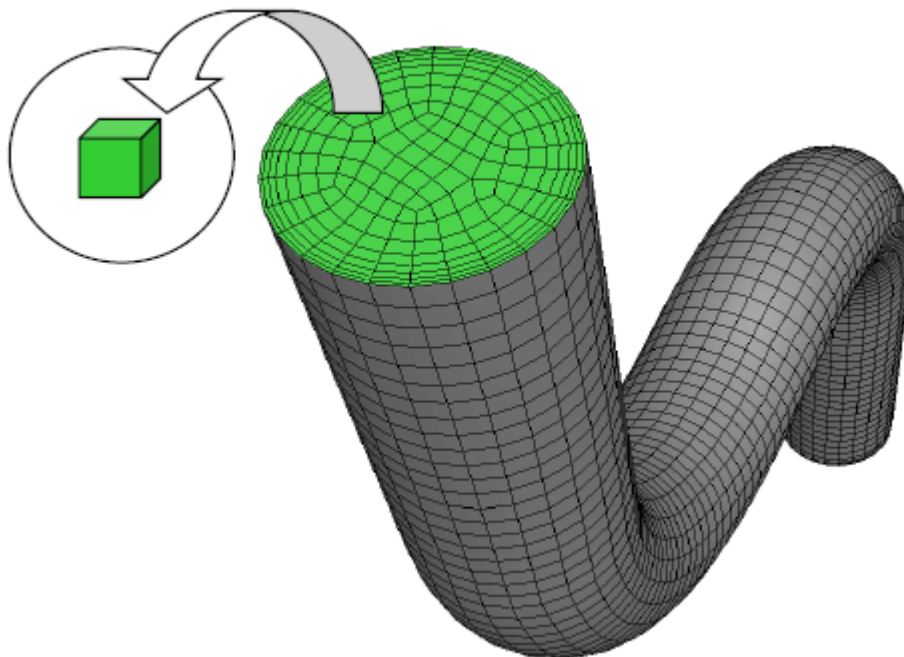
Metoda konečných objemů spočívá ve třech základních bodech:

- dělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě,
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace,
- numerické řešení diskretizovaných rovnic v obecném tvaru, kde součet se provede přes sousední buňky  $i=N, S, E, W, F, B$  (což označuje sever-north, jih-south, východ-east,

západ-west, vpřed-front, vzad-back).

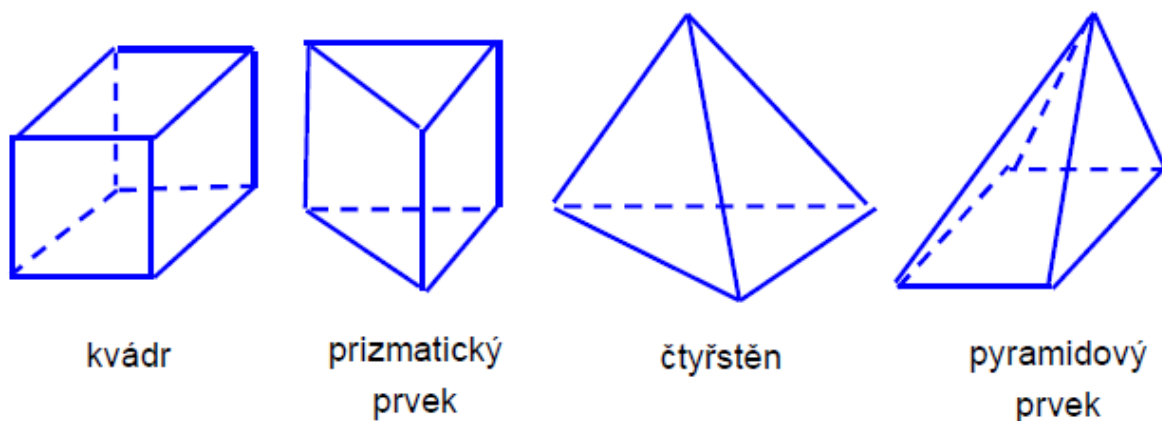
#### 4.3.1 Dělení oblastí – tvorba geometrie a výpočetní sítě

Sít' představuje systém rozdělení na dílčí výpočetní oblasti navzájem na sebe navazující 2D buňky ve dvoudimenzionálním prostoru nebo 3D buňky ve třídimenzionálním prostoru, viz příklad sítě Obr. 4-1.



Obr. 4-1: Příklad výpočetní sítě

Takto vytvořená sít' se nazývá **strukturovaná sít'**. Zásadním pravidlem je, že hranice prvků musí sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu, nelze tedy libovolně zhušťovat sít'. Také výsledná výpočtová oblast je pak kvádr nebo obdélník. V současné době se začíná prosazovat nový přístup, kdy se buduje tzv. **nestrukturovaná sít'**. Konečným objemem je ve 3D kvádr, čtyřstěn, prizmatikový a pyramidový prvek, jehož výhody byly ověřeny v úlohách pružnosti, řešených metodou konečných prvků, viz Obr. 4-2.



**Obr. 4-2: Tvar konečného objemu**

Výše vyjmenované prvky se v současné době mohou kombinovat, čímž se získá optimální síť, kde v okolí stěny jsou použity čtyřúhelníky a kvádry (pro výpočet z hlediska přesnosti jsou optimální) a v dalších oblastech, kde nedochází z důvodu existence mezní vrstvy k velkým gradientům řešených veličin, se použijí zbývající prvky. Ty zajistí snadnou změnu hustoty sítě.

Počet buněk patří k hlavním limitujícím faktorům současného matematického modelování. U mnohých praktických úloh se počty buněk výpočtové oblasti pohybují v řádu milionů či mnohdy i desítek milionů. Nejsou to zanedbatelná čísla. Proto je cílem každého řešitele s ohledem na budoucí čas výpočtu redukovat počet buněk na nutné minimum. Minimalizování počtu buněk by však nemělo být prováděno na úkor kvality sítě. Z hlediska reálného možného počtu buněk však v praxi dodržení všech ideálních předpokladů pro tvorbu sítě není většinou možné. Proto se používá zhušťování sítě v místech, která jsou z hlediska proudění tekutin nebo sdílení tepla pro řešitele zajímavá nebo pro výpočet stěžejní a naopak použití řidší sítě v místech jiných. Zvláštním případem zhuštění buněk je vytvoření tzv. mezní vrstvy v blízkosti stěn, která má za úkol zachytit velké změny fyzikálních veličin u stěny. Zhušťování buněk by mělo být plynulé. Pokud by byla změna ve velikosti buněk provedena příliš velkou skokovou změnou, projevilo by se to znatelně na průběhu výpočtu (problémy s konvergencí úlohy) i konečném výsledku výpočtu (chybný výsledek v daném místě výpočtové oblasti).

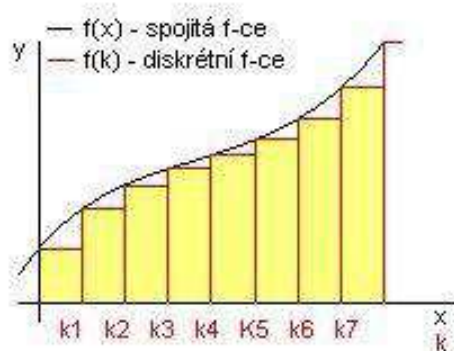
#### **Kvalita sítě se posuzuje podle:**

- velikosti buněk (s ohledem na modelovaný děj a požadavek na přesnost výpočtu),
- vhodnosti uspořádání buněk v prostoru (například zhuštění v místech zajímavých z hlediska proudění tekutin) s ohledem na konkrétní typ úlohy,

- kvality buněk (nesouměrnost – Skewness, poměr hran (ploch) prvků - Aspect Ratio, atd.).

### 4.3.2 Diskretizace

Diskretizací se nazývá náhrada spojitého prostředí (kontinua) systémem diskrétních bodů, v nichž se soustředí fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti příslušného místa kontinua. Při studiu fyzikálních jevů se tím zpravidla nutnost řešení parciálních diferenciálních rovnic převádí na řešení obyčejných diferenciálních, popřípadě algebraických rovnic.



Obr. 4-3: Diskretizace funkce

### 4.3.3 Numerické řešení výpočtu

Řešení rovnic probíhá v jednotlivých cyklech nazvaných iterace. Hodnoty okrajových podmínek působí na okolní buňky sítě a v celé oblasti probíhá pod tímto vlivem změna. Každá iterace se stává z kroků, které jsou zobrazeny na Obr. 4-4 a jsou popsány takto:

- pohybové rovnice pro neznámé složky rychlosti jsou řešeny s užitím hodnot tlaků tak, aby se aktualizovalo rychlostní pole,
- rychlosti určené v předchozím bodě nemohou splňovat rovnici kontinuity, proto se určují tzv. tlakové korekce a následně korekce i rychlostního pole,
- pomocí nových hodnot rychlostí se řeší rovnice pro turbulentní energii  $k$  a disipaci  $\epsilon$ ,
- řeší se další rovnice pro určení teploty a dalších skalárních veličin,
- aktualizují se fyzikální vlastnosti kapalin (např. viskozita),
- kontrola konvergence.





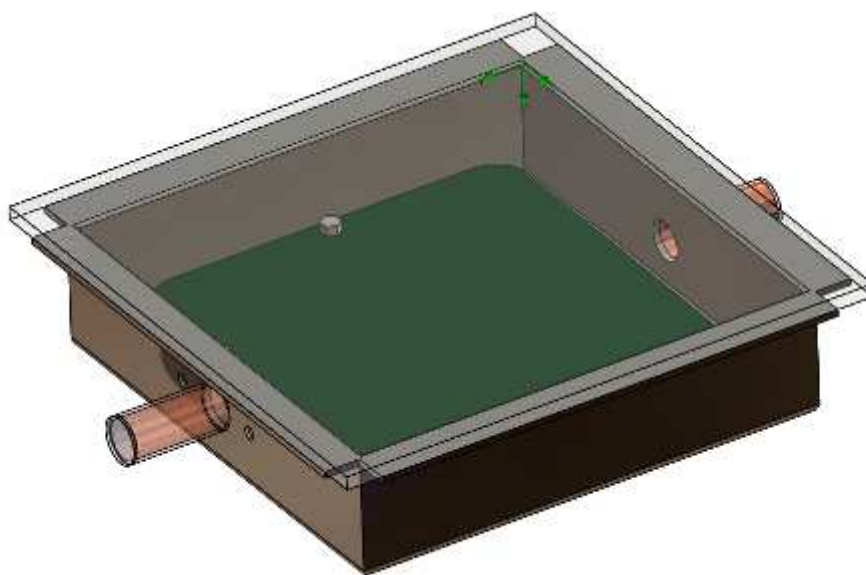
Obr. 4-4: Cyklus výpočtu

Jestli hovoříme o matematických modelech, které jsou založeny na numerickém řešení systému parciálních diferenciálních rovnic a vyžadují takto i zadání okrajových podmínek, lze konstatovat, že možnosti realizování úlohy jsou silně limitovány výkonem počítačové techniky. Platí zde několik zásad:

- výpočet je o to náročnější (pomalejší), čím více rovnic je v rámci matematického modelu do výpočtu zahrnuto (podle náročnosti a komplexnosti modelu),
- výpočet je o to náročnější, čím více má výpočtová oblast buněk,
- výpočet je o to náročnější, čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti.

## 5 Základní model

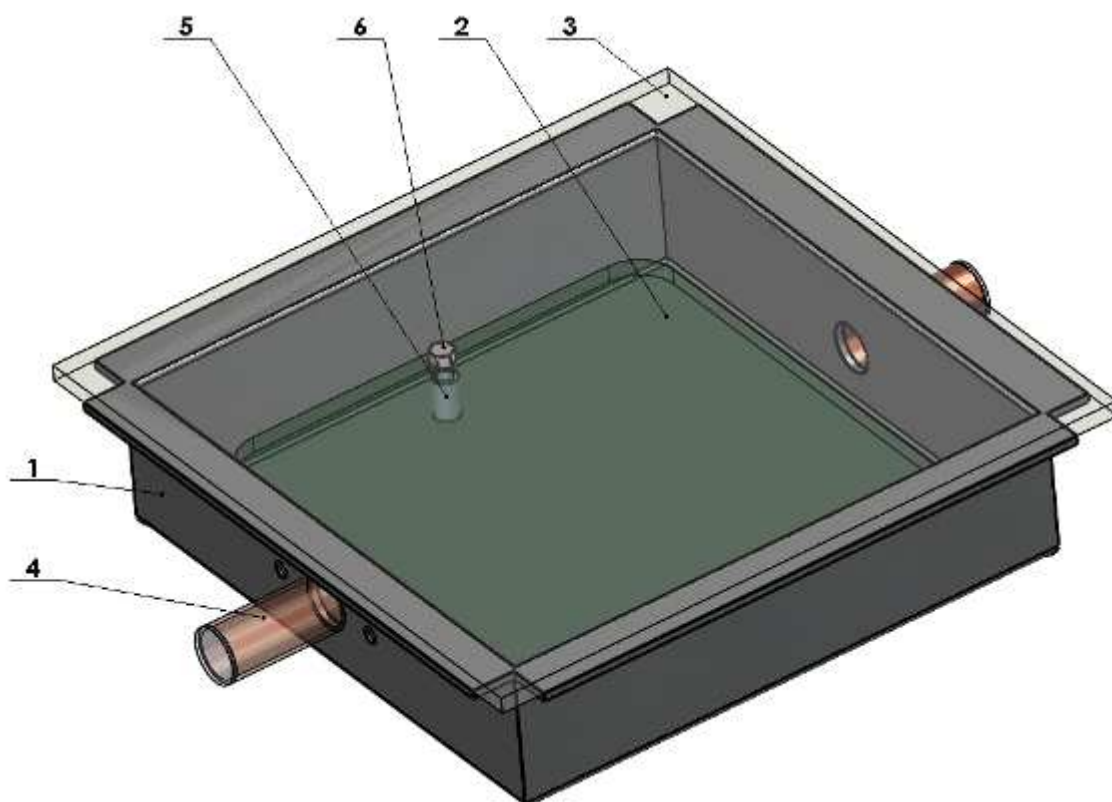
Na fotografii (Obr. 5-2) je uveden skutečný výchozí model koncentrátorového článku, který je na Ústavě elektrotechnologie. Na obrázku (Obr. 5-1) je model namodelovaný pomocí programu Solid Works. Chladicí medium článků je voda. Obrázky Obr. 5-4, Obr. 5-5 a Obr. 5-6 udávají výkresovou dokumentaci předloženého základního modelu. Na obrázku Obr. 5-3 je uvedeno rozvržení a názvosloví jednotlivých částí základního modelu. Z teoretického poznatku je třeba, aby teplota samotného fotovoltaického článku se pohybovala v rozmezí mezi 20 až 30°C. Při zahřání <50 °C začne výkon samotného článku prudce klesat, až může dojít k jeho nenávratnému zničení.



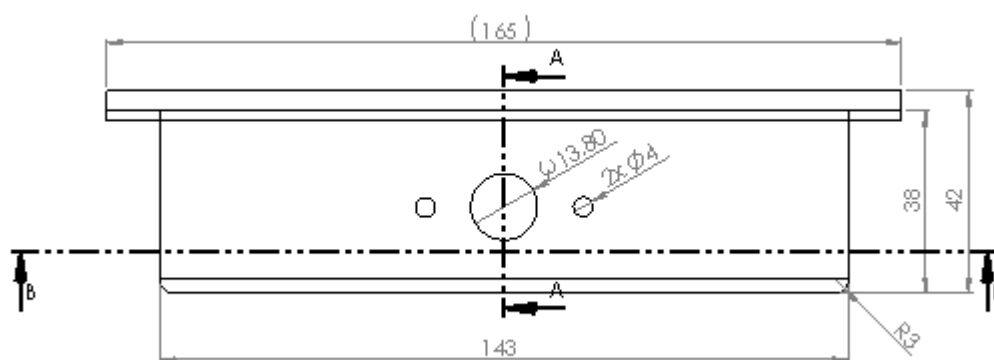
**Obr. 5-1: Namodelovaný základní funkční model v programu SolidWorks**



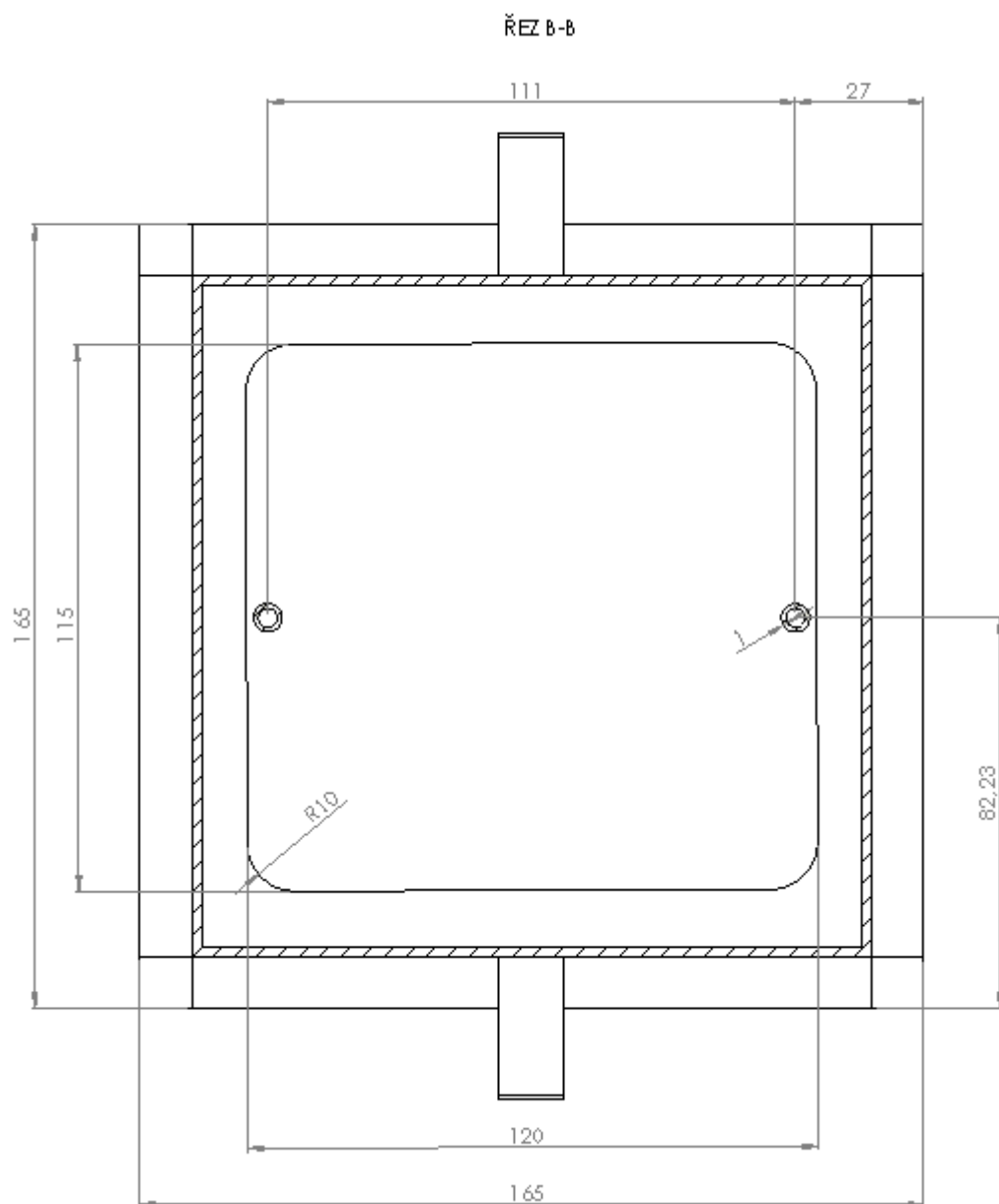
**Obr. 5-2: Skutečný základní model**



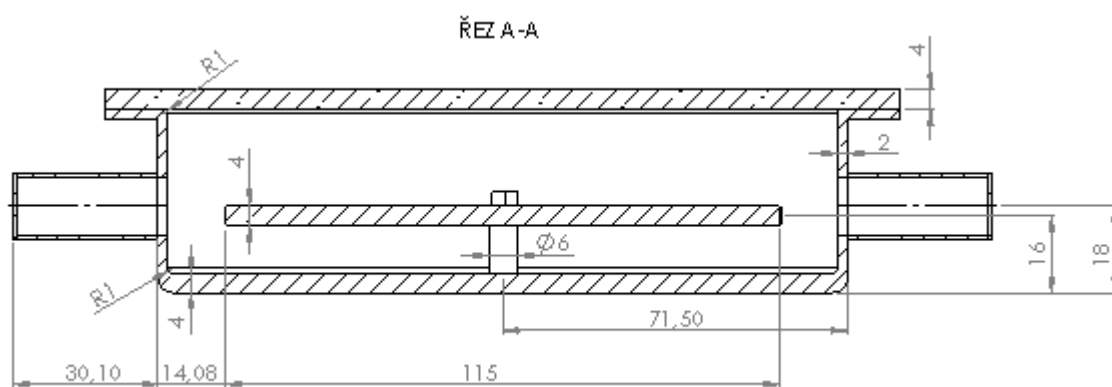
Obr. 5-3: Pozice jednotlivých částí základního funkčního modelu (1 – vana, 2 – fotovoltaický článek, 3 – sklo, 4 – přítoková trubka, 5 – sloupek, 6 – šroub)



Obr. 5-4: Výkresová dokumentace základního tvaru



Obr. 5-5: Výkresová dokumentace základního modelu (Řez B-B)



Obr. 5-6: Výkresová dokumentace základního modelu (Řez A-A)

## 6 Simulace v programu SolidWorks Flow Simulation

Základní model se shoduje s modelem popsaným v kapitole 5. Základní model byl podroben simulaci, viz kapitola 6.1. Z výsledků byly zahájeny kroky optimalizace, které jsou popsány v této kapitole.

### 6.1 Základní model

#### Okrajové podmínky:

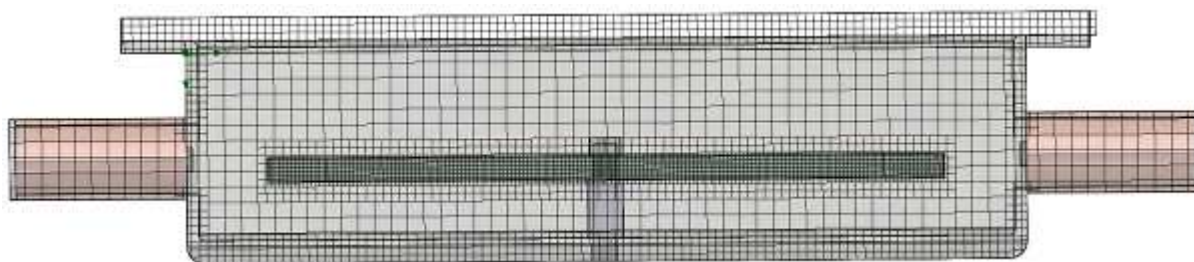
Vstup chladícího média: objemový tok: 3 l/min (50 ml/s) = **0,00005 m<sup>3</sup>/s**,  
teplota **20.05 °C**

Výstup chladícího média: výtok do atmosféry – statický tlak: **101325 Pa**

Povrch skleněné desky: nastavená intenzita teploty na povrch: **15000 W/m<sup>2</sup>**

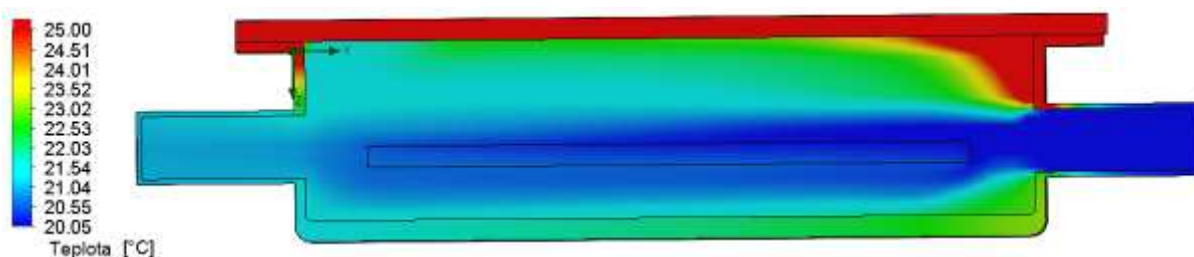
|                                       | Maximální    | Minimální | Průměrná | Celkový průměr | Objem [m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------------------|--------------|-----------|----------|----------------|-------------------------|
| Teplota na fotovoltaickém článku [°C] | <b>22,52</b> | 20,05     | 21,3     | <b>21,3</b>    | 2,7E-05                 |

Tabulka 3: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku v základním modelu

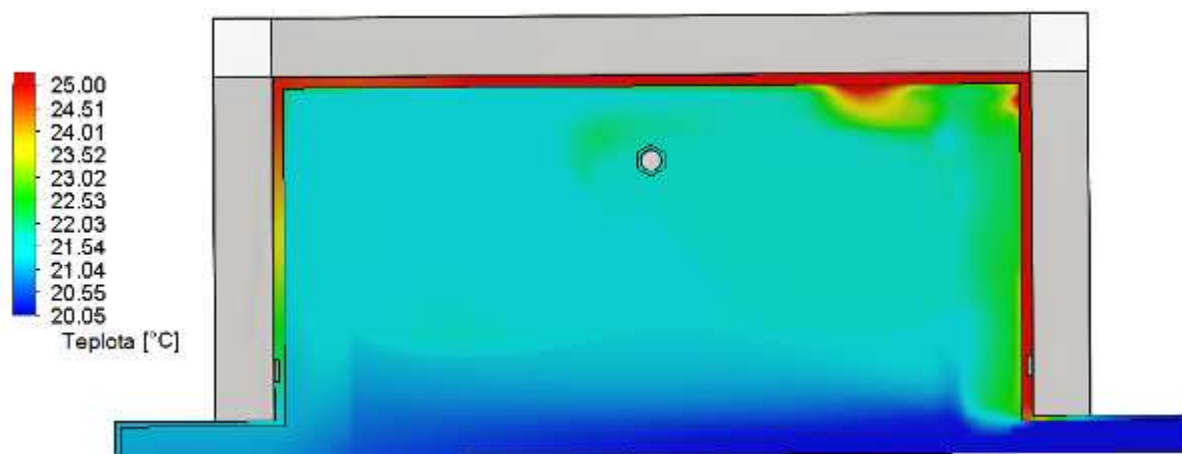


Obr. 6-1: Nastavená výpočetní síť pro základní model

Na Obr. 6-1 je znázorněna výpočetní síť pro základní model. V každém místě je jiná hustota sítě. Na okrajích a stěnách je nastavena ve vyšší hustotě než v objemu nádoby. Je to z důvodu úspory doby trvání výpočtu. Není potřeba, aby hustota byla v celé výpočetní oblasti stejná. Nej hustší výpočetní síť je vytvořena v okolí a na fotovoltaickém článku, protože zde jsou potřeba přesné výsledky. V této úvaze je tvořena výpočetní síť v každém předloženém modelu.

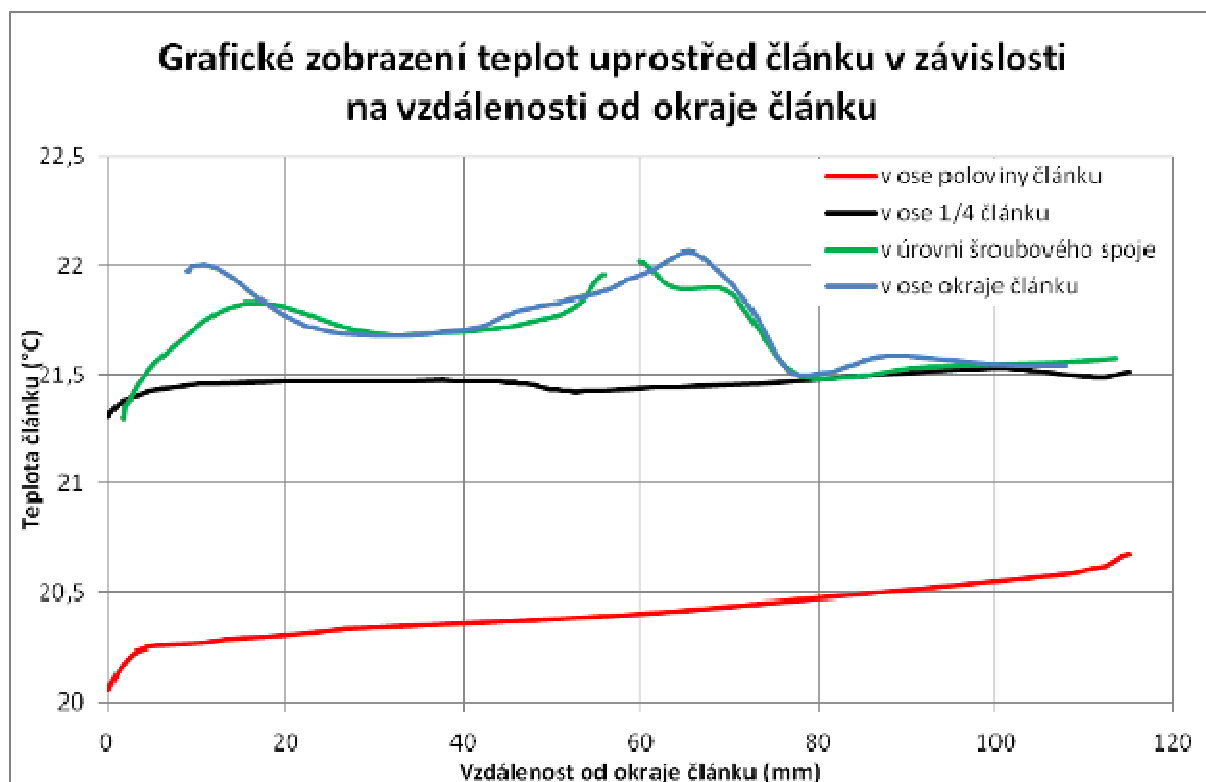


Obr. 6-2: Simulace zahřívání základního modelu

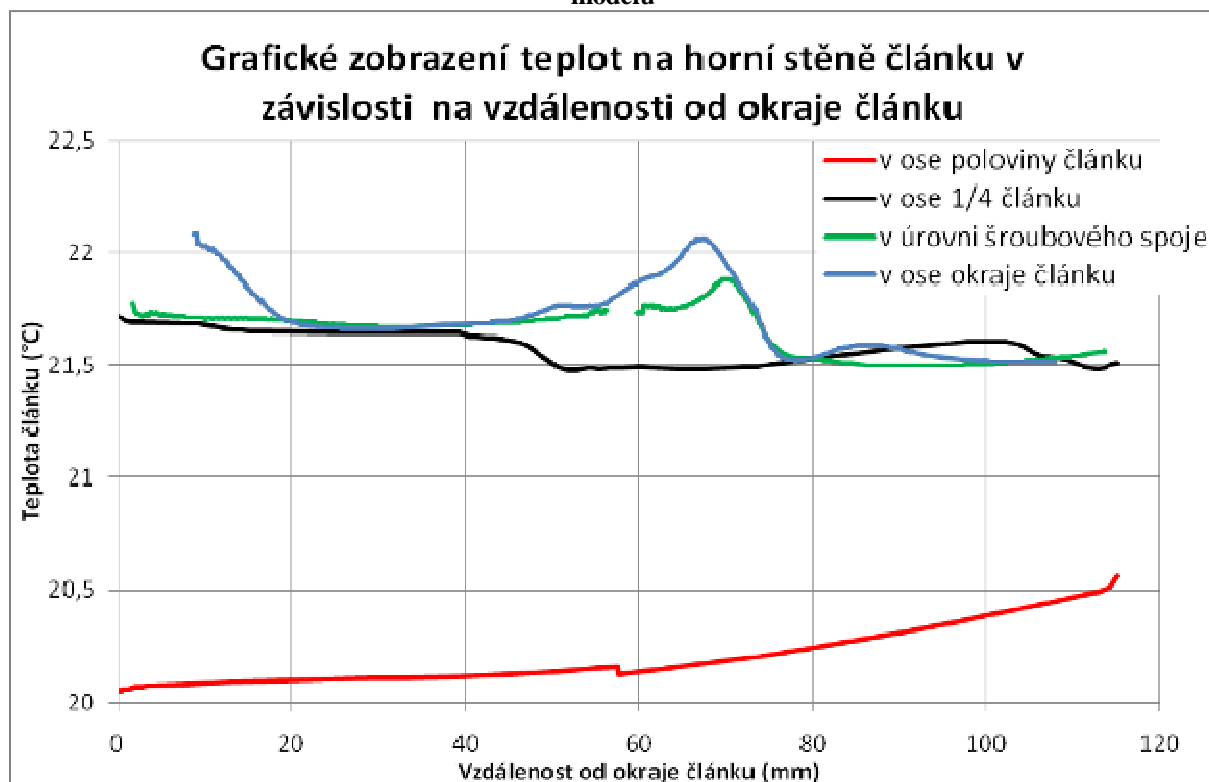


Obr. 6-3: Simulace zahřívání základního modelu pohled ze shora

V Tabulka 3 jsou uvedeny teplotní výsledky na fotovoltaickém článku. Teplotně článek vyhovuje, avšak velkým nedostatkem je nekonstantní teplota fotovoltaického článku. Z Obr. 6-3, kde je vidět teplotní rozložení na povrchu fotovoltaického článku, je patrné, že čím je větší vzdálenost od středu osy proudění média, tím je vyšší teplota fotovoltaického článku. Grafické závislosti Obr. 6-4, Obr. 6-5 a Obr. 6-6 dokládají tento jev. Nejnižší teploty jsou v ose poloviny článku – ve střední oblasti článku, naopak nejvyšší teploty vykazuje okraj článku.

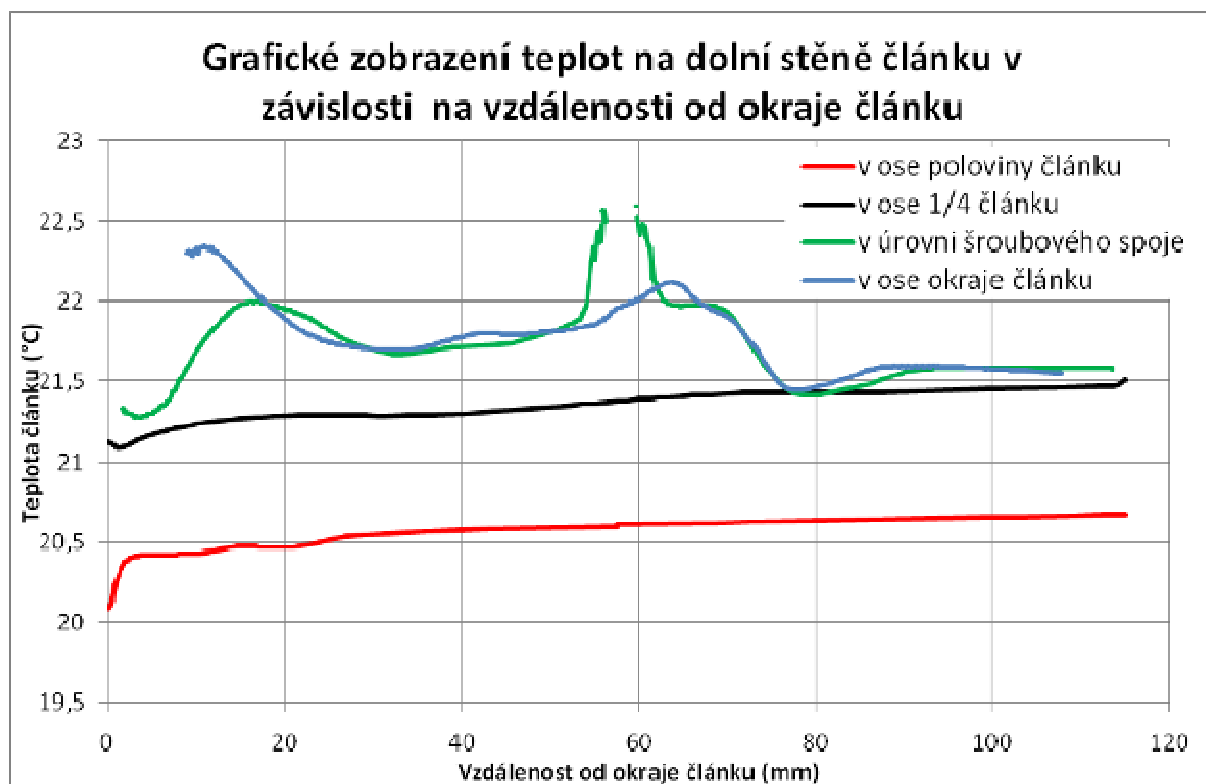


Obr. 6-4: Teplotní závislost střední roviny člunku na vzdálenosti od strany přítoku člunku v základním modelu

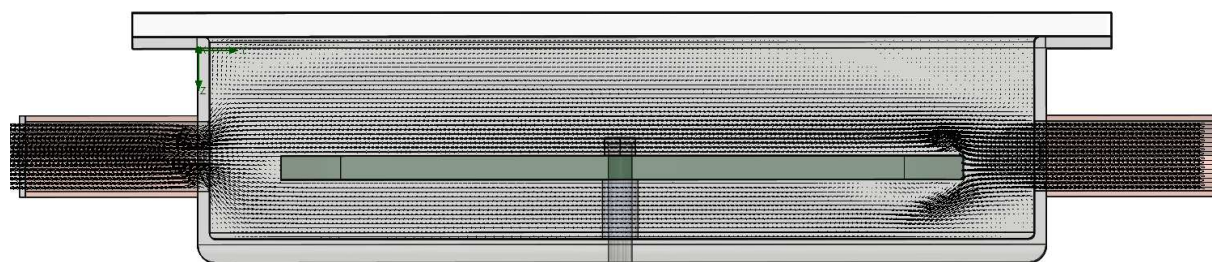


Obr. 6-5: Teplotní závislost horní stěny člunku na vzdálenosti od strany přítoku člunku v základním modelu

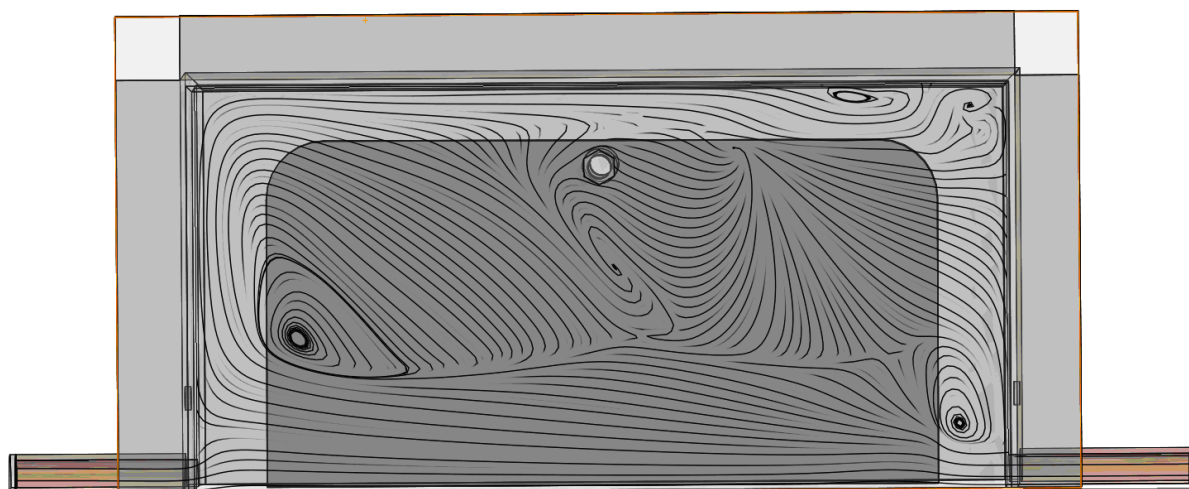




**Obr. 6-6: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku v základním modelu**

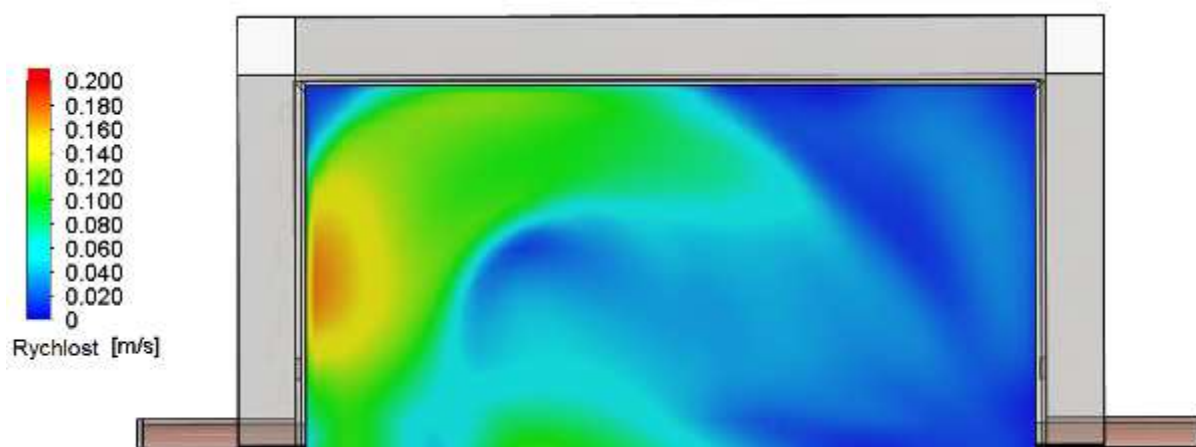


**Obr. 6-7: Simulace proudění média základního modelu**

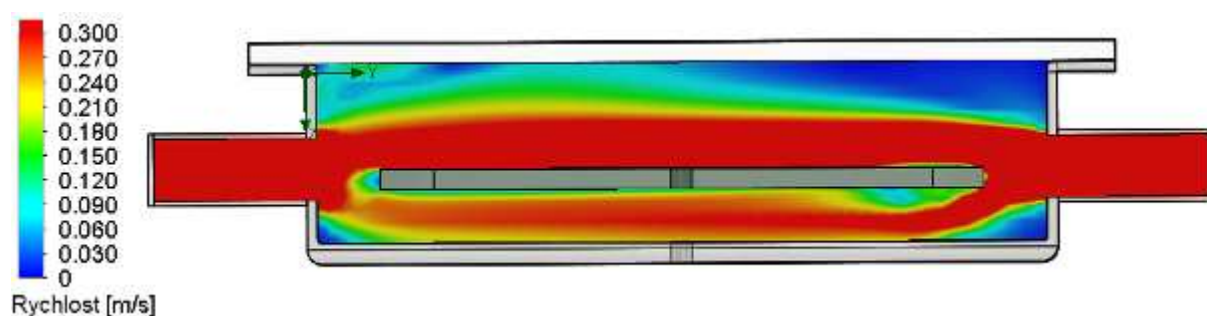


**Obr. 6-8: Simulace proudění média základního modelu, pohled ze shora**





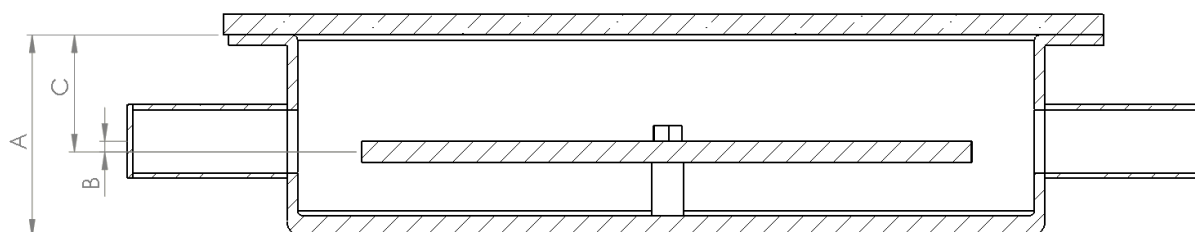
Obr. 6-9: Simulace rychlosti proudění základního modelu, pohled ze shora



Obr. 6-10: Simulace rychlosti proudění základního modelu, pohled ze shora

Na Obr. 6-7 se tvoří víry z důvodu kolmé plochy fotovoltaického článku vůči otvoru, kterým přitéká chladicí médium. Z Obr. 6-8 je zobrazena simulace proudění média 1 mm nad povrchem fotovoltaického článku. Obrázek dokládá tvoření vírů hned v několika oblastech modelu. Jednotlivé víry způsobují nekonzantní rychlost proudění, které je zobrazeno na Obr. 6-9. Zobrazená simulace rychlosti proudění (Obr. 6-9) je také ve vzdálenosti 1 mm nad povrchem fotovoltaického článku.

V dalším kroku byl základní model podroben výškové úpravě přítokové trubky, výšky vany a vzdálenosti fotovoltaického článku od skla. Na Obr. 6-11 jsou tyto výškové vzdálenosti reprezentovány hodnotami  $A$ ,  $B$  a  $C$ . Výsledky jsou uvedeny v Tabulka 4.



Obr. 6-11: Popis základního provedení

| verze       | objemový tok<br>[m <sup>3</sup> /s] | maximální teplota článku<br>[°C] | minimální teplota článku<br>[°C] | průměrná teplota článku<br>[°C] | vzdálenost A [mm] | vzd. B [mm] | vzd. C [mm] |
|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------|-------------|
| zákl. model | 0,00005                             | 22,52                            | 20,05                            | 21,3                            | 38                | 2           | 20          |
| varianta_2  | 0,00005                             | 22,18                            | 20,05                            | 21,16                           | 36                | 1           | 19          |
| varianta_3  | 0,00005                             | 22,64                            | 20,05                            | 21,1                            | 34                | 0           | 18          |
| varianta_4  | 0,00005                             | 23,12                            | 20,05                            | 21,3                            | 32                | -1          | 17          |
| varianta_5  | 0,00005                             | 23,51                            | 20,05                            | 21,46                           | 30                | -2          | 16          |
| varianta_6  | 0,00005                             | 24,39                            | 20,05                            | 22,3                            | 28                | -3          | 15          |
| varianta_7  | 0,00005                             | 26,12                            | 20,06                            | 22,24                           | 26                | -4          | 14          |

**Tabulka 4: Výsledky simulací v základním modelu s různými vzdálenostmi**

Z dosažených výsledků lze tvrdit, že pro optimálnější způsob chlazení je třeba dosahovat co nejmenší vzdálenosti mezi středem fotovoltaického článku a středem přítokové trubky (hodnota *B*). Žádná z variant oproti variantě základní nevykazuje výrazně lepších hodnot.

## 6.2 Vysavačový model

Na základě simulace základního modelu byl navržen zcela jiný typ přítoku a odtoku média – vysavačový přítok. Vysavačový přítok má přítokovou plochu 2 x 130 mm. Tento typ přítoku byl navržen z důvodu požadavku celoplošně stálých teplot samotného fotovoltaického článku.

### Okrajové podmínky:

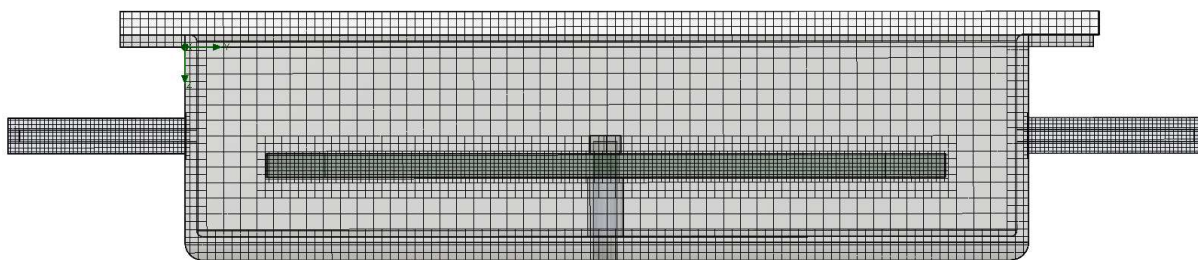
Vstup chladicího média: objemový tok: 3 l/min (50 ml/s) = **0,00005 m<sup>3</sup>/s**,  
teplota **20.05 °C**

Výstup chladicího média: výtok do atmosféry – statický tlak: **101325 Pa**

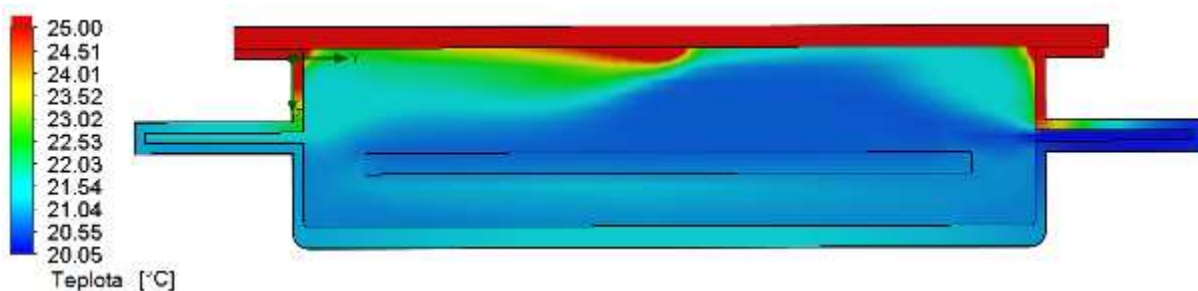
Povrch skleněné desky: nastavená intenzita teploty na povrch: **15000 W/m<sup>2</sup>**

|                                       | Maximální    | Minimální | Průměrná | Celkový průměr | Objem [m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------------------|--------------|-----------|----------|----------------|-------------------------|
| Teplota na fotovoltaickém článku [°C] | <b>21,61</b> | 20,59     | 20,8     | <b>20,8</b>    | 2,7E-05                 |

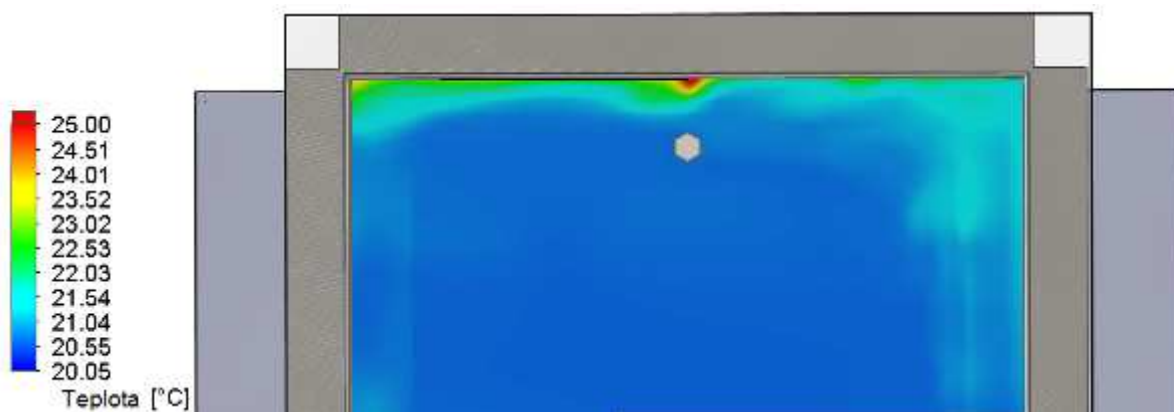
**Tabulka 5: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku na modelu s vysavačovým přítokem**



Obr. 6-12: Nastavená výpočetní síť pro vysavačový model

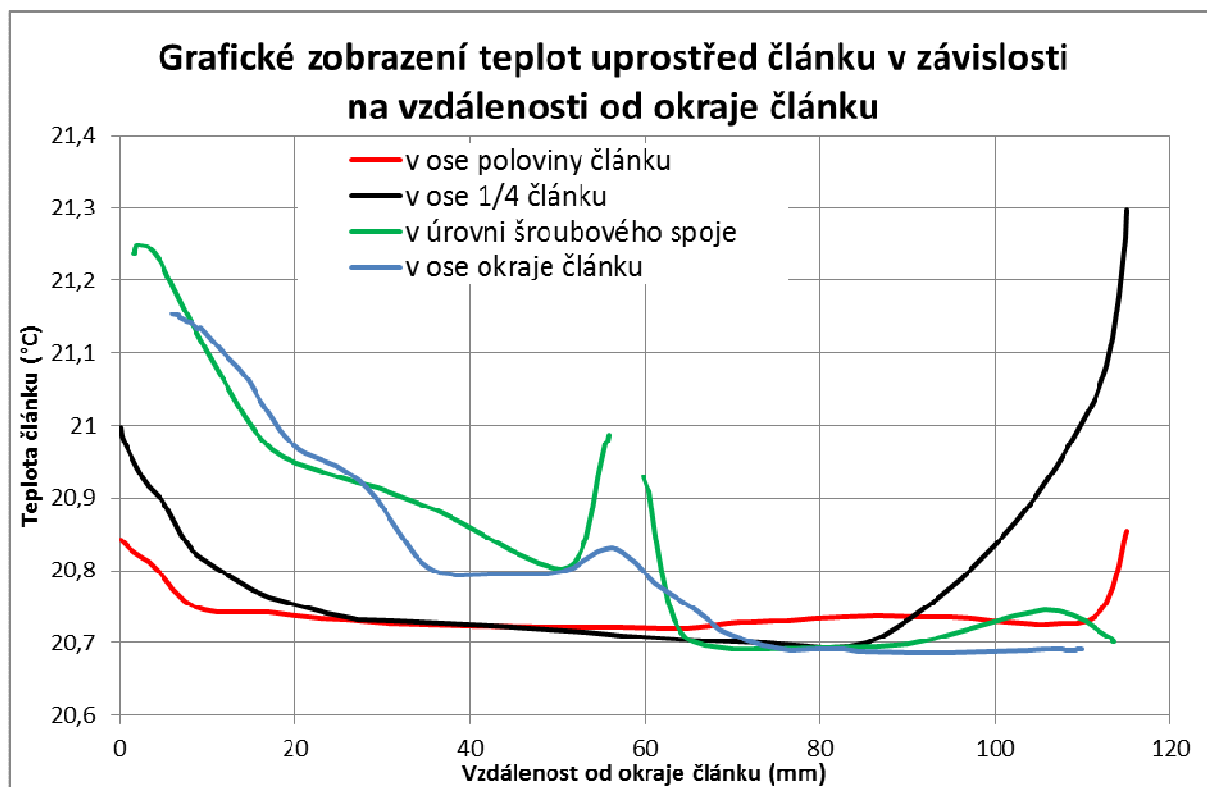


Obr. 6-13: Simulace zahřívání na modelu s vysavačovým přívodem

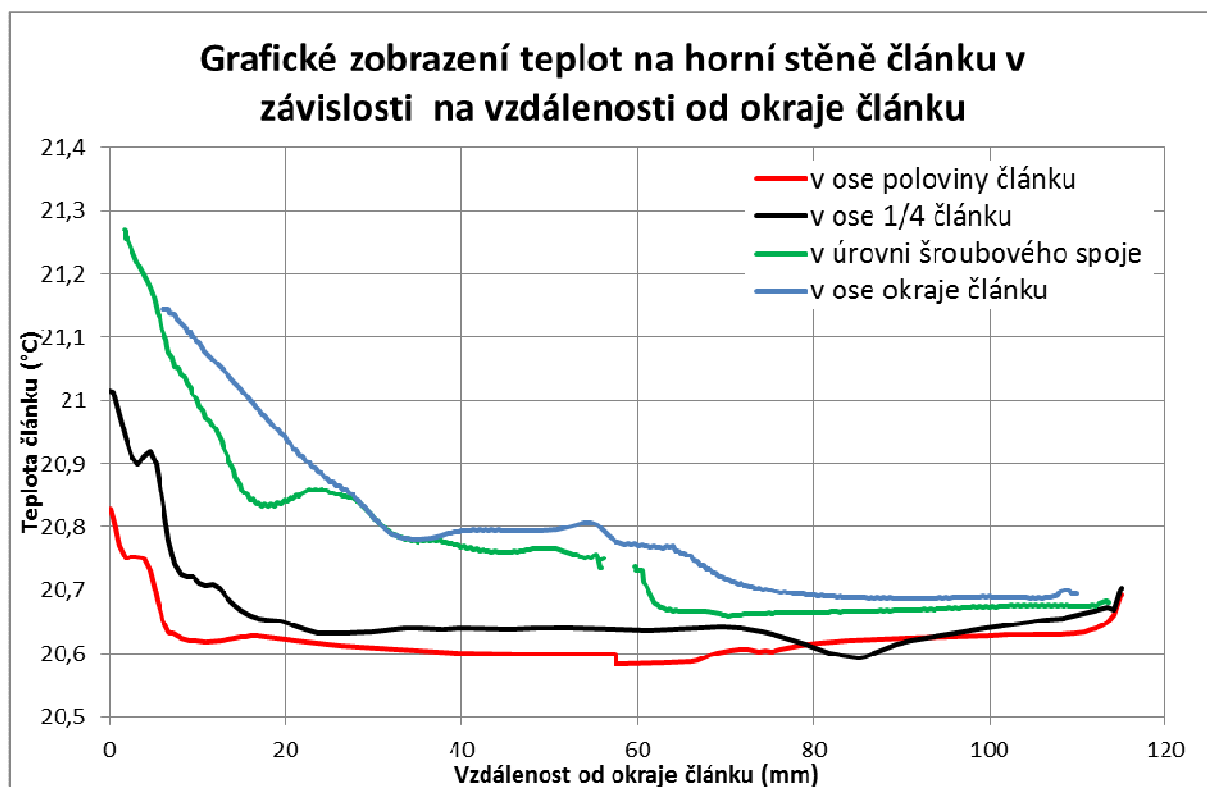


Obr. 6-14: Simulace zahřívání na modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora

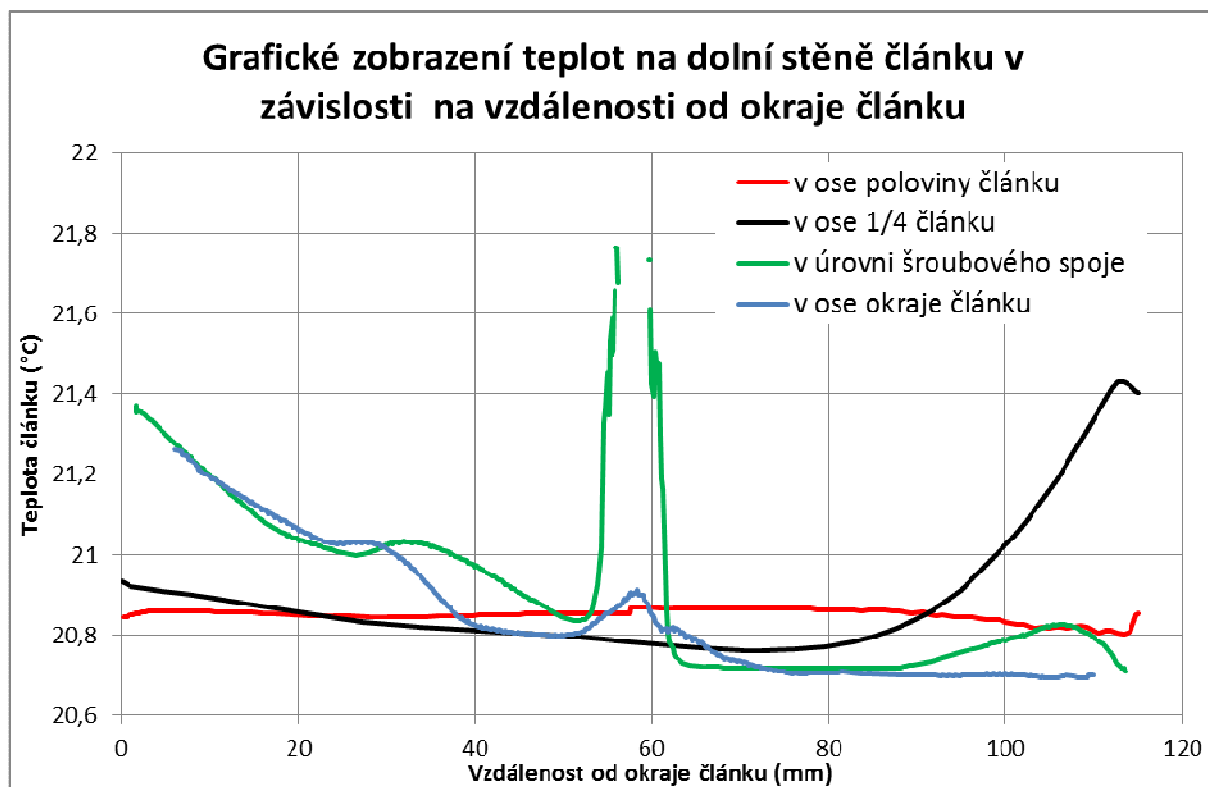
V Tabulka 5 jsou uvedeny výsledné teploty na fotovoltaickém článku. Na Obr.6-14 oproti základnímu modelu (Obr. 6-3) je vidět, že na povrchu fotovoltaického článku je teplota mnohem stálější. Graf na Obr. 6-15 a Obr. 6-16 ukazuje problematické chlazení na straně přítoku chladicího média, které je způsobeno špatnou cirkulací média. Graf na Obr. 6-17 ukazuje problémové chlazení na dolní stěně článku ve šroubovém spoji.



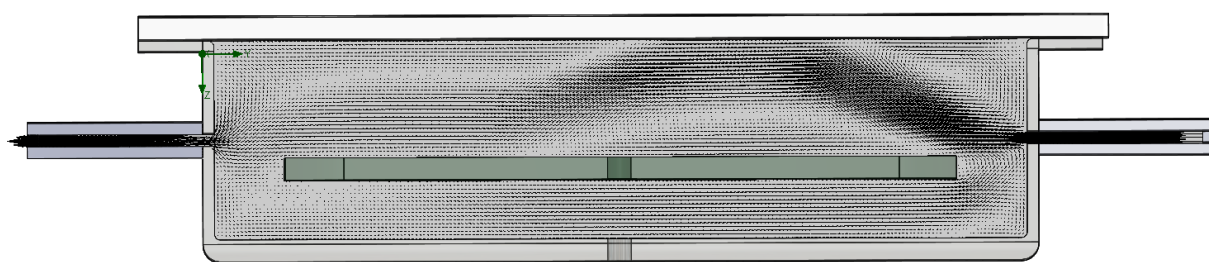
Obr. 6-15: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vysavačovém modelu



Obr. 6-16: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vysavačovém modelu



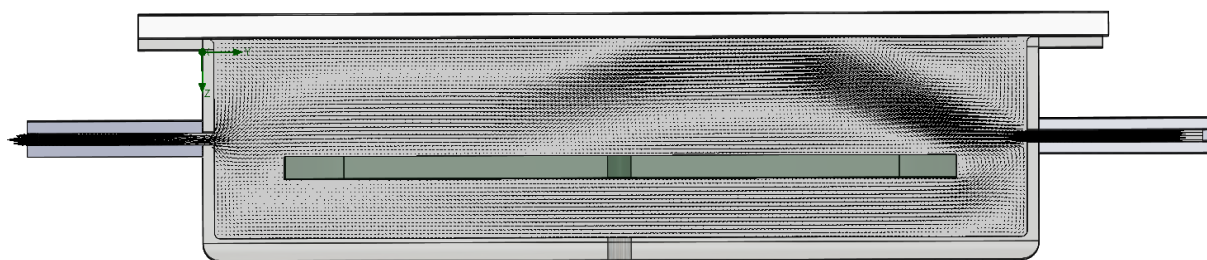
Obr. 6-17: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vysavačovém modelu



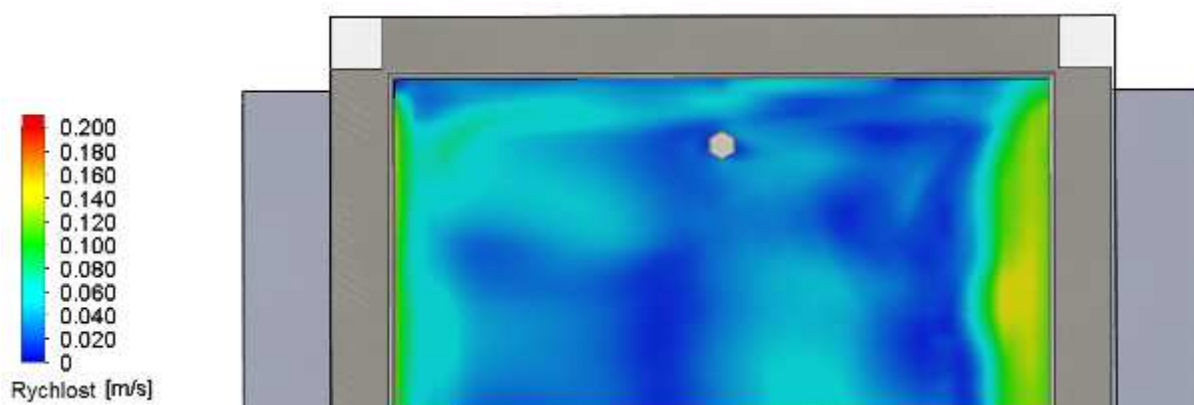
Obr. 6-18: Simulace proudění na modelu s vysavačovým příívodem



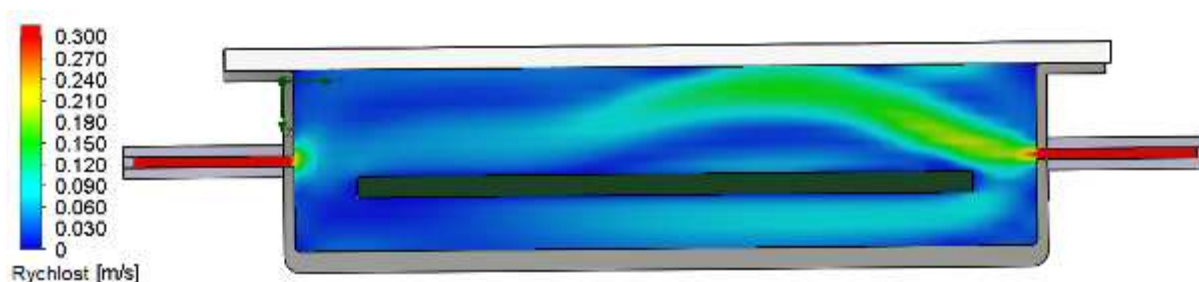
Obr. 6-19: Simulace proudění na modelu s vysavačovým příívodem, pohled ze shora



Obr. 6-18 je patrné, že přítokový proud média (voda) se odklání od fotovoltaického článku a směřuje nahoru na sklo. Z Obr. 6-21 potom vidíme, že rychlost proudění média není největší kolem článku, jak by bylo pro optimální chlazení článku potřebné. Popsaný problém přispívá i k tvoření vírů, které dokládá Obr. 6-19 a následně i Obr. 6-20. Tento děj je zachycen 1 mm nad fotovoltaickým článkem.



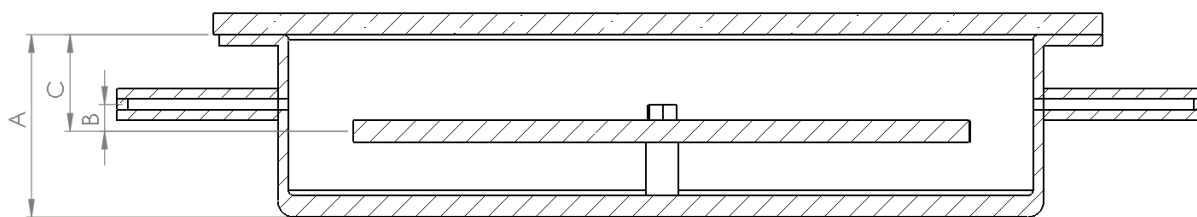
**Obr. 6-20: Simulace rychlosti proudění média na modelu s vysavačovým příívodem, pohled ze shora**



**Obr. 6-21: Simulace rychlosti proudění média na modelu s vysavačovým příívodem**

Z výše popsaných skutečností u modelu s vysavačovým přítokem je třeba snížit prostor mezi fotovoltaickým článkem a sklem. Ale zároveň při snížení vzdálenosti skla od fotovoltaického článku hrozí zhoršení chlazení samotného článku. Pro toto riziko byly vyhotoveny a podrobeny simulacím různé varianty. U jednotlivých variant se měnily vzdálenosti (vzdálenosti jsou reprezentovány hodnotami A, B a C, dle Obr. 6-22) a příivodní objemový tok. Celkové výsledky jsou uvedeny v Tabulka 6, tyto výsledky jsou uvedeny také v grafickém zobrazení (Obr. 6-23 a Obr. 6-24).



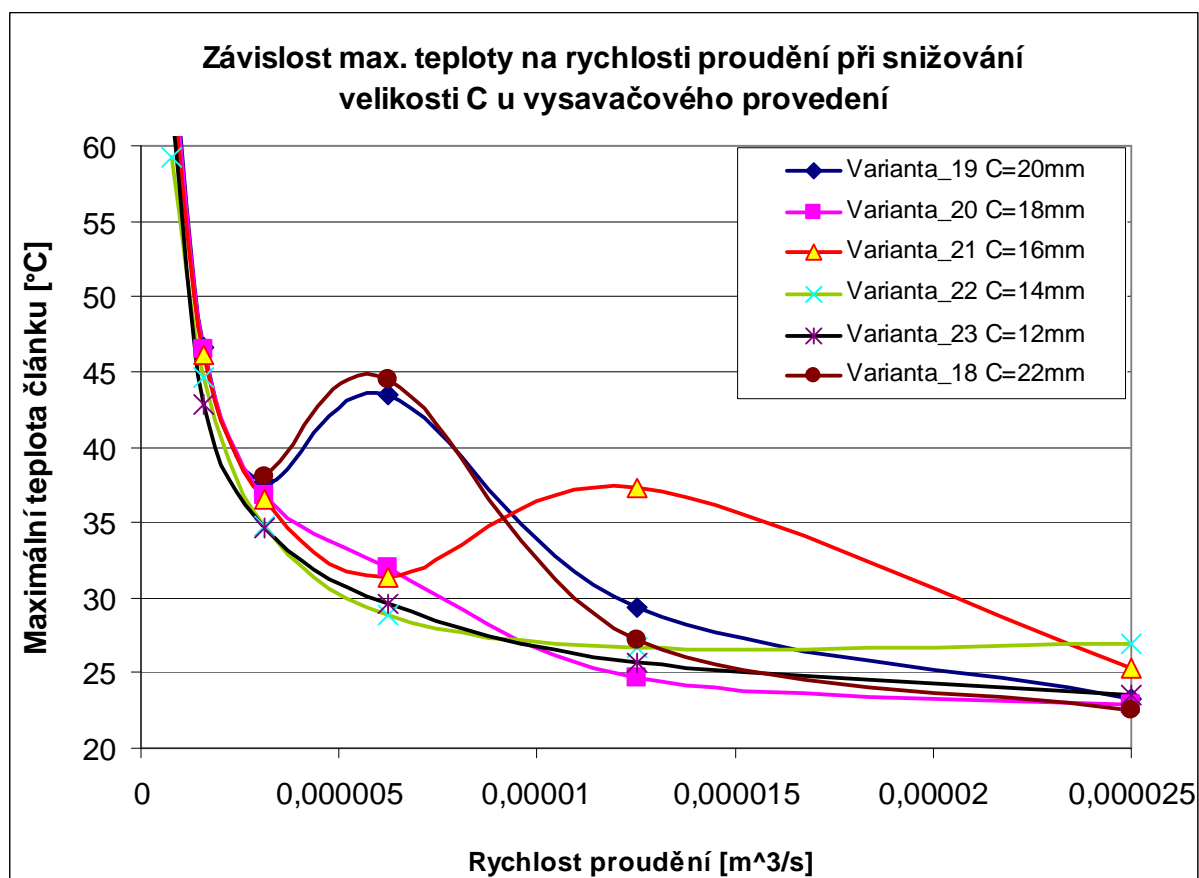


Obr. 6-22: Popis vysavačového provedení

| verze           | objemový tok<br>[m <sup>3</sup> /s] | teplota fotovoltaického článku<br>[°C] |           |          | Vzdálenost<br>[mm] |   |    |
|-----------------|-------------------------------------|--|-----------|----------|--------------------|---|----|
|                 |                                     | maximální                              | minimální | průměrná | A                  | B | C  |
| varianta_18_pr2 | 0,000025                            | 22,57                                  | 20,61     | 21,4     | 38                 | 5 | 22 |
| varianta_18_pr3 | 0,0000125                           | 27,13                                  | 21,65     | 22,79    | 38                 | 5 | 22 |
| varianta_18_pr4 | 0,00000625                          | 44,52                                  | 24,06     | 26,99    | 38                 | 5 | 22 |
| varianta_18_pr5 | 0,000003125                         | 38,1                                   | 25,84     | 27,64    | 38                 | 5 | 22 |
| varianta_19_pr2 | 0,000025                            | 23,24                                  | 20,08     | 21,53    | 36                 | 5 | 20 |
| varianta_19_pr3 | 0,0000125                           | 29,39                                  | 22,3      | 24,6     | 36                 | 5 | 20 |
| varianta_19_pr4 | 0,00000625                          | 43,5                                   | 23,17     | 27,95    | 36                 | 5 | 20 |
| varianta_19_pr5 | 0,000003125                         | 37,71                                  | 26,62     | 28,33    | 36                 | 5 | 20 |
| varianta_19_pr6 | 1,5625E-06                          | 46,66                                  | 31,18     | 35,17    | 36                 | 5 | 20 |
| varianta_19_pr7 | 7,8125E-07                          | 66,93                                  | 42,91     | 50,27    | 36                 | 5 | 20 |
| varianta_20_pr2 | 0,000025                            | 22,92                                  | 20,91     | 21,3     | 34                 | 5 | 18 |
| varianta_20_pr3 | 0,0000125                           | 24,68                                  | 21,28     | 21,73    | 34                 | 5 | 18 |
| varianta_20_pr4 | 0,00000625                          | 32,05                                  | 22,74     | 24,37    | 34                 | 5 | 18 |
| varianta_20_pr5 | 0,000003125                         | 36,73                                  | 25,24     | 26,27    | 34                 | 5 | 18 |
| varianta_20_pr6 | 1,5625E-06                          | 46,45                                  | 30,42     | 33,62    | 34                 | 5 | 18 |
| varianta_20_pr7 | 7,8125E-07                          | 66,11                                  | 33,6      | 46,3     | 34                 | 5 | 18 |
| varianta_21_pr2 | 0,000025                            | 25,3                                   | 21,12     | 22,4     | 32                 | 5 | 16 |
| varianta_21_pr3 | 0,0000125                           | 37,29                                  | 21,5      | 24,41    | 32                 | 5 | 16 |
| varianta_21_pr4 | 0,00000625                          | 31,31                                  | 23,1      | 24,91    | 32                 | 5 | 16 |
| varianta_21_pr5 | 0,000003125                         | 36,59                                  | 25,4      | 26,19    | 32                 | 5 | 16 |
| varianta_21_pr6 | 1,5625E-06                          | 46,09                                  | 29,39     | 32,63    | 32                 | 5 | 16 |
| varianta_21_pr7 | 7,8125E-07                          | 64,3                                   | 32,42     | 44,59    | 32                 | 5 | 16 |
| varianta_22_pr2 | 0,000025                            | 26,98                                  | 21,66     | 22,46    | 30                 | 5 | 14 |
| varianta_22_pr3 | 0,0000125                           | 26,69                                  | 21,89     | 23,72    | 30                 | 5 | 14 |
| varianta_22_pr4 | 0,00000625                          | 28,86                                  | 22,46     | 22,99    | 30                 | 5 | 14 |
| varianta_22_pr5 | 0,000003125                         | 34,77                                  | 24,75     | 25,29    | 30                 | 5 | 14 |
| varianta_22_pr6 | 1,5625E-06                          | 44,62                                  | 27,94     | 31,1     | 30                 | 5 | 14 |
| varianta_22_pr7 | 7,8125E-07                          | 59,22                                  | 30,13     | 40,77    | 30                 | 5 | 14 |
| varianta_23_pr2 | 0,000025                            | 23,59                                  | 20,89     | 21,55    | 28                 | 5 | 12 |
| varianta_23_pr3 | 0,0000125                           | 25,63                                  | 21,75     | 22,64    | 28                 | 5 | 12 |
| varianta_23_pr4 | 0,00000625                          | 29,54                                  | 22,59     | 23,14    | 28                 | 5 | 12 |
| varianta_23_pr5 | 0,000003125                         | 34,63                                  | 23,87     | 24,76    | 28                 | 5 | 12 |

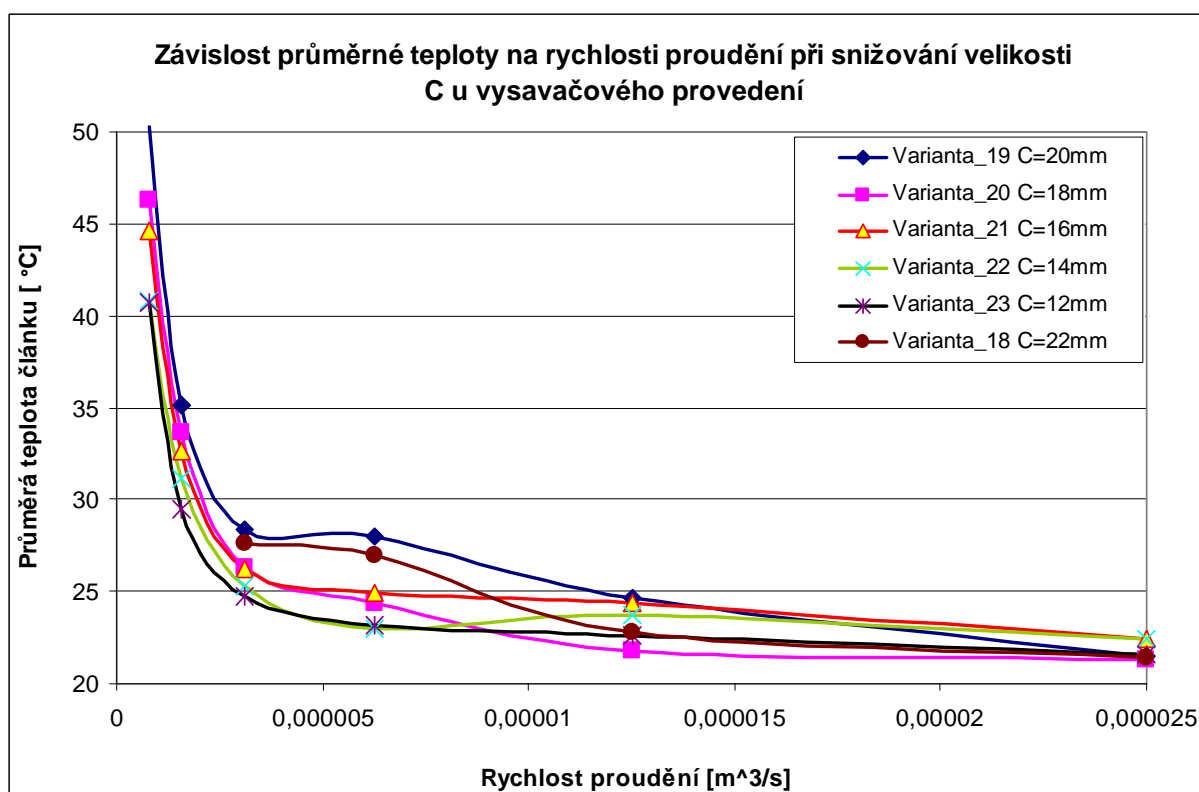
|                 |            |       |       |       |    |   |    |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|----|---|----|
| varianta_23_pr6 | 1,5625E-06 | 42,82 | 26,98 | 29,52 | 28 | 5 | 12 |
| varianta_23_pr7 | 7,8125E-07 | 62,47 | 29,89 | 40,69 | 28 | 5 | 12 |

Tabulka 6: Výsledné hodnoty při změně vzdáleností fotovoltaického článku a skla



Obr. 6-23: Grafické zobrazení maximální teploty na rychlosti proudění při snižování velikosti C



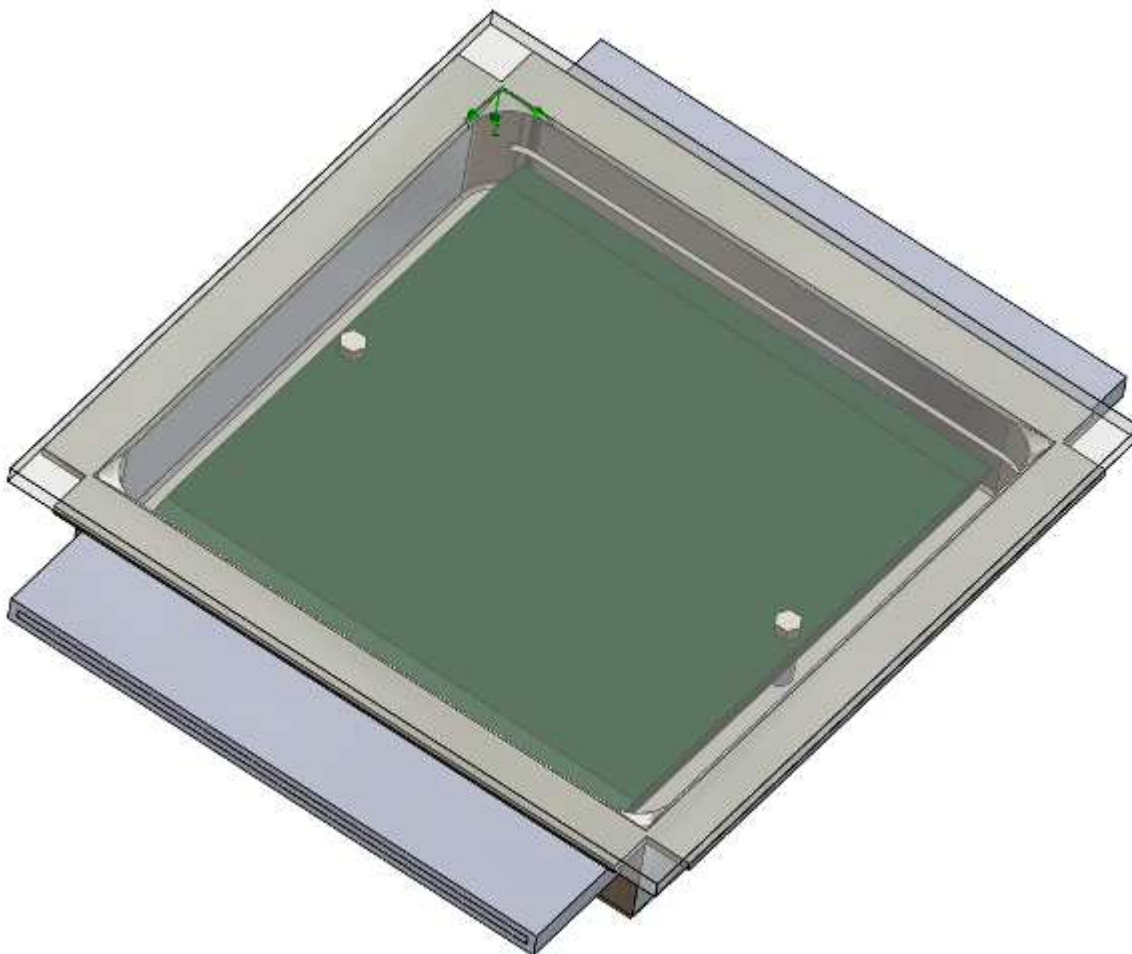


Obr. 6-24: Grafické zobrazení průměrné teploty na rychlosti proudění při snižování velikosti C

Z grafického zobrazení Obr. 6-23 a Obr. 6-24 je patrné, že při snižování vzdálenosti mezi fotovoltaickým článkem a sklem se obávané riziko o zhoršení chlazení samotného článku nepotvrdilo. Naopak jako lepší varianta je číslo 23, která má tuto vzdálenost nižší.

### 6.3 Optimalizovaný vysavačový model

Z předchozích dosažených výsledků je navržen nový model Obr. 6-25. Fotovoltaickému článku byly vytvořeny náběžné hrany. Tyto náběžné hrany mají zajistit plynulejší proudění média okolo fotovoltaického článku. Dále bylo vytvořeno zaoblení na rohách vany, z důvodu zamezení krajních vírů. Z předchozích simulací byla vytvořena teorie, že je třeba sjednotit vzdálenost fotovoltaického článku ode dna vany se vzdáleností fotovoltaického článku od skla. Od sjednocení vzdáleností se slibuje, že přispějí ke konstantnější rychlosti proudění média nad fotovoltaickým článkem.



**Obr. 6-25: Optimalizovaný vysavačový model**

#### **Okrajové podmínky:**

Vstup chladícího média: objemový tok: 1,5 l/min (25 ml/s) = **0,000025 m<sup>3</sup>/s**,  
teplota **20.05 °C**

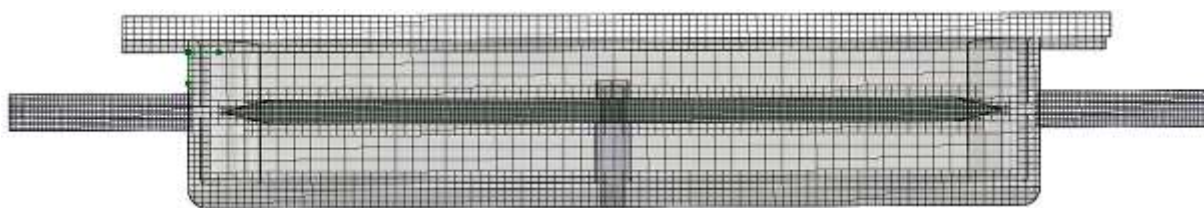
Výstup chladícího média: výtok do atmosféry – statický tlak: **101325 Pa**

Povrch skleněné desky: nastavená intenzita teploty na povrch: **15000 W/m<sup>2</sup>**

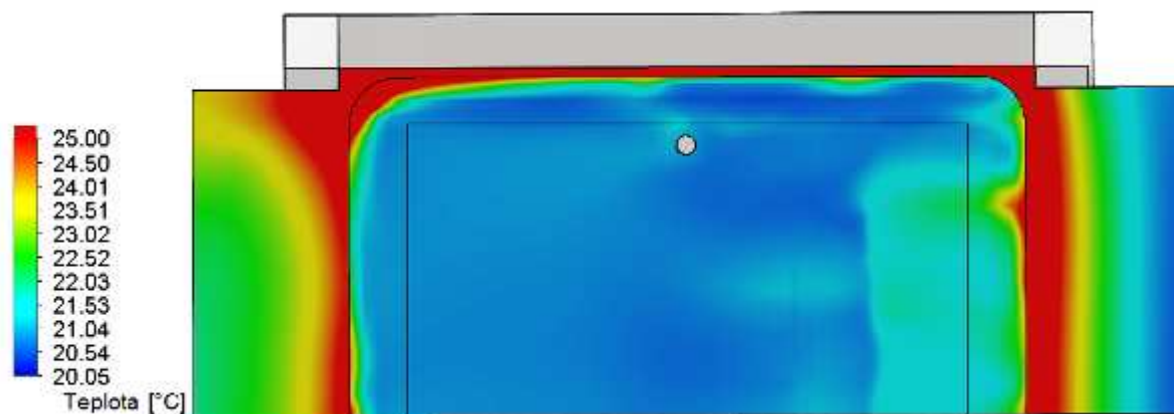
Z důvodu prokazatelnějších výsledků byl vstupní objemový tok chladícího média o polovinu snížen, protože při původním nastavení (0,000025 m<sup>3</sup>/s) se výsledné hodnoty od sebe lišily již nepatrně.

|                                       | <b>Maximální</b> | <b>Minimální</b> | <b>Průměrná</b> | <b>Celkový průměr</b> | <b>Objem [m<sup>3</sup>]</b> |
|---------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|
| Teplota na fotovoltaickém článku [°C] | <b>22,36</b>     | 20,3             | 20,71           | <b>20,71</b>          | 2,9E-05                      |

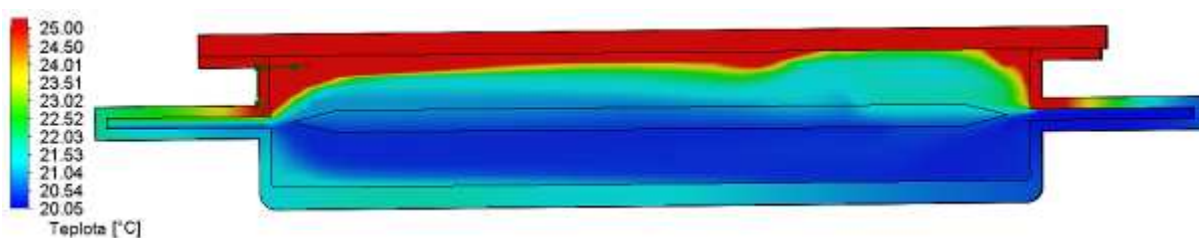
**Tabulka 7: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku na optimalizovaném modelu s vysavačovým přítokem**



Obr. 6-26: Nastavená výpočetní síť pro optimalizovaný vysavačový model

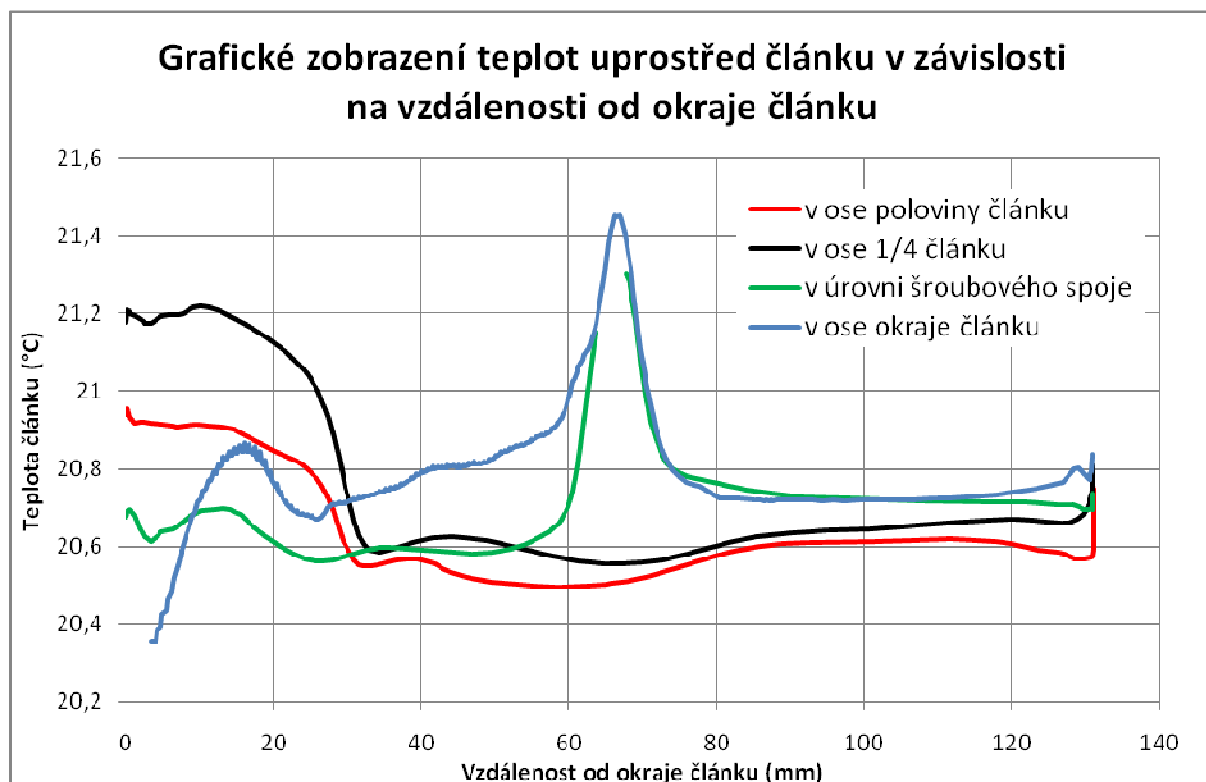


Obr. 6-27: Simulace zahřívání na modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora

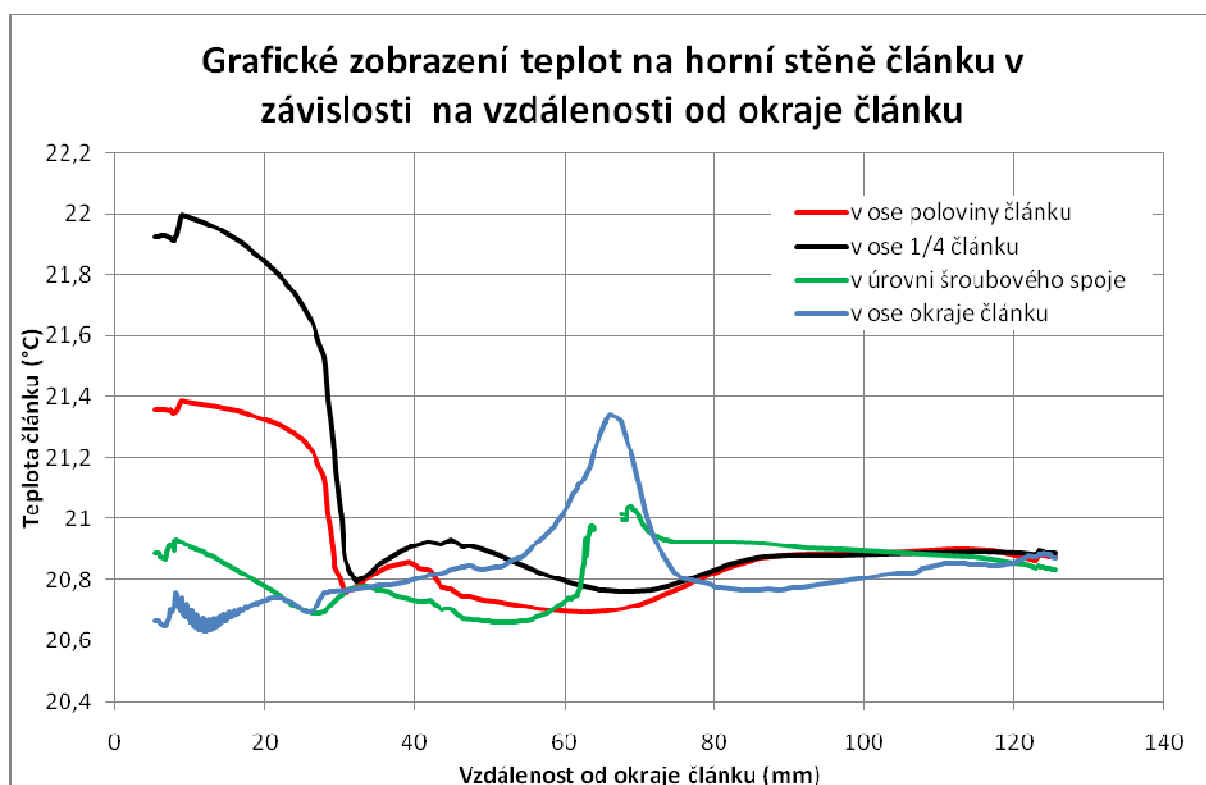


Obr. 6-28: Simulace zahřívání na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem

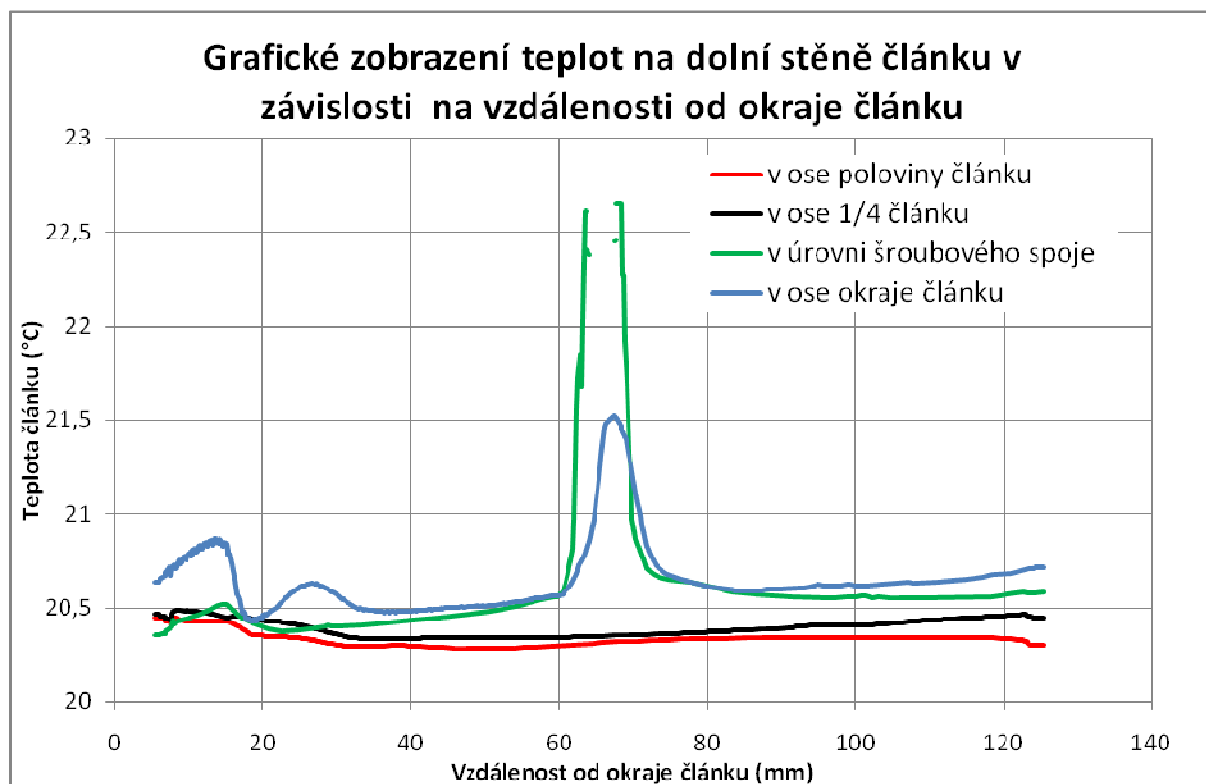
Na Obr. 6-27 a Obr. 6-28 vidíme simulaci zahřívání, kde je patrné, že článek na straně přívodu chladicího média není dobře chlazen. Grafické závislosti na Obr. 6-29 a Obr. 6-30 tento problém potvrzují. Je to způsobeno víry, které se při vstupní straně tvoří (Obr. 6-33). Jak můžeme vidět na Obr. 6-35, pravděpodobně tyto víry odráží další přívodní tok chladicího média na spodní stranu fotovoltaického článku. Dolní stěna článku vykazuje problémové chlazení v oblasti šroubového spoje, viz obrázky Obr. 6-31. Dále z Obr. 6-32 je vidět, že rohy vany zůstávají „hluché“ – rychlost proudění média (vody) je nízká, a tak se stává nevyužitou pro chlazení.



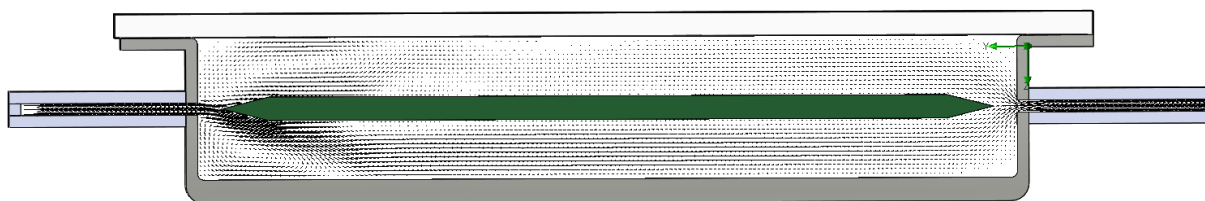
Obr. 6-29: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku v optimalizovaném vysavačovém modelu



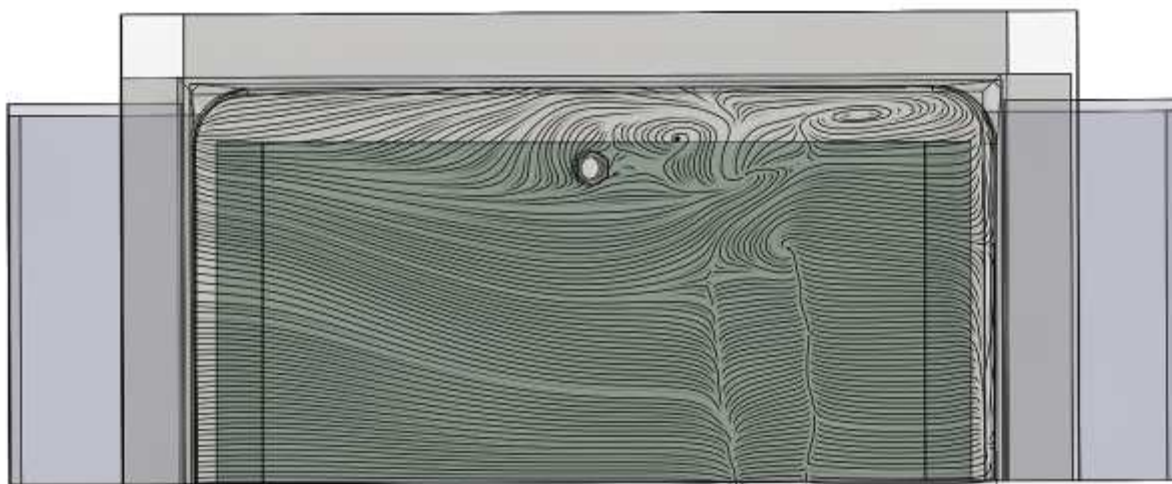
Obr. 6-30: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku v optimalizovaném vysavačovém modelu



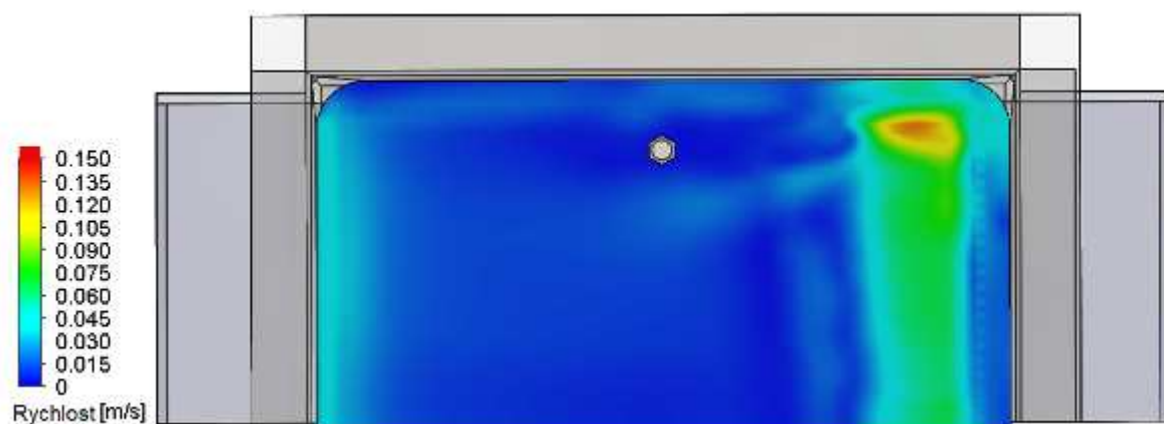
**Obr. 6-31: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku v optimalizovaném vysavačovém modelu**



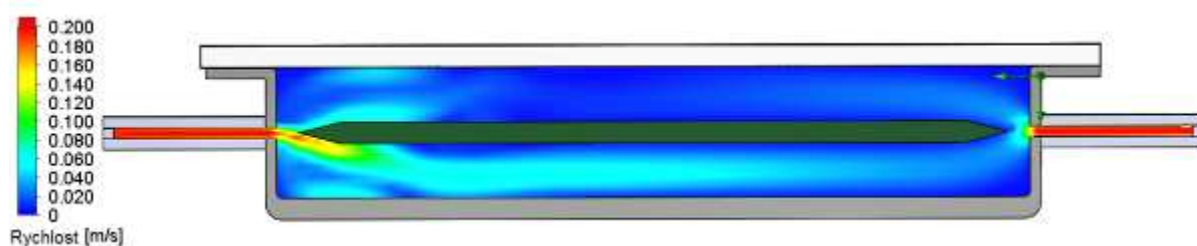
**Obr. 6-32: Simulace proudění na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem**



**Obr. 6-33: Simulace proudění na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora**



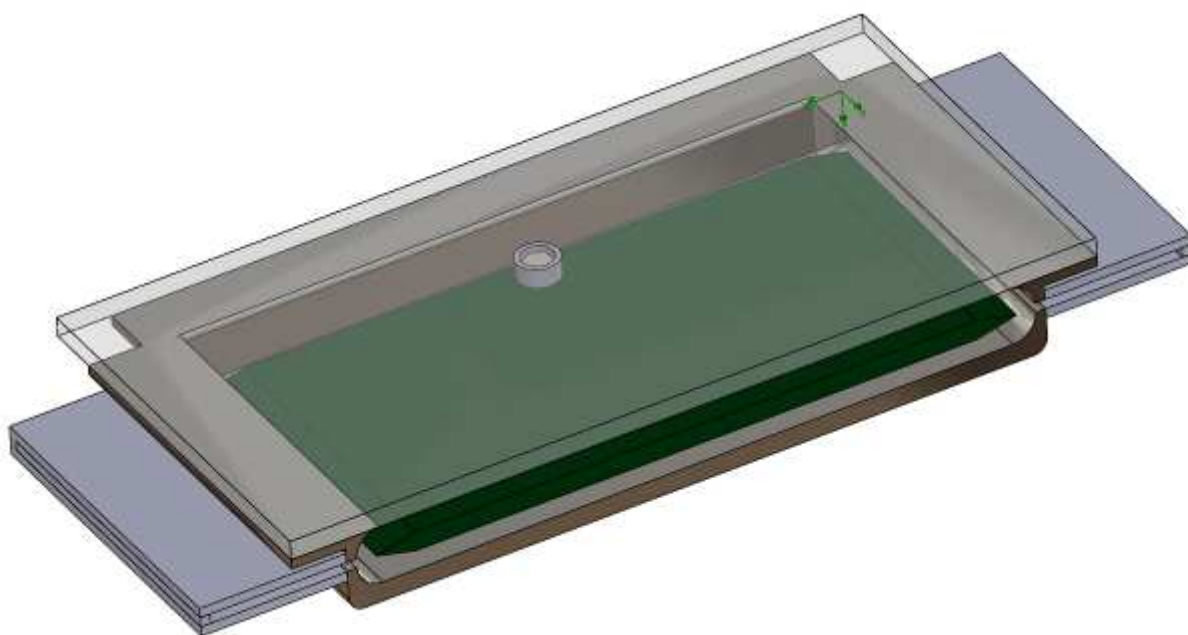
Obr. 6-34: Simulace rychlosti proudění média na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem, pohled ze shora



Obr. 6-35: Simulace rychlosti proudění média na optimalizovaném modelu s vysavačovým přívodem

## 6.4 Vanový model

U tohoto modelu (Obr. 6-36) byla snížena velikost vany, aby se zamezilo tvoření vírů a zvýšila se rychlost proudění chladicího média. Dále k odstranění „hluchých“ míst byly v rozích vany vytvořeny zaoblené hrany. V předchozí verzi také vznikaly víry kolem šroubu. Pro zamezení tohoto nepříznivého jevu byl vyroben válcový náhubek, který je vsazen na šroub.



Obr. 6-36: Vanový model



### Okrajové podmínky:

Vstup chladicího média: objemový tok: 1,5 l/min (25 ml/s) = **0,000025 m<sup>3</sup>/s**,  
teplota **20.05 °C**

Výstup chladicího média: výtok do atmosféry – statický tlak: **101325 Pa**

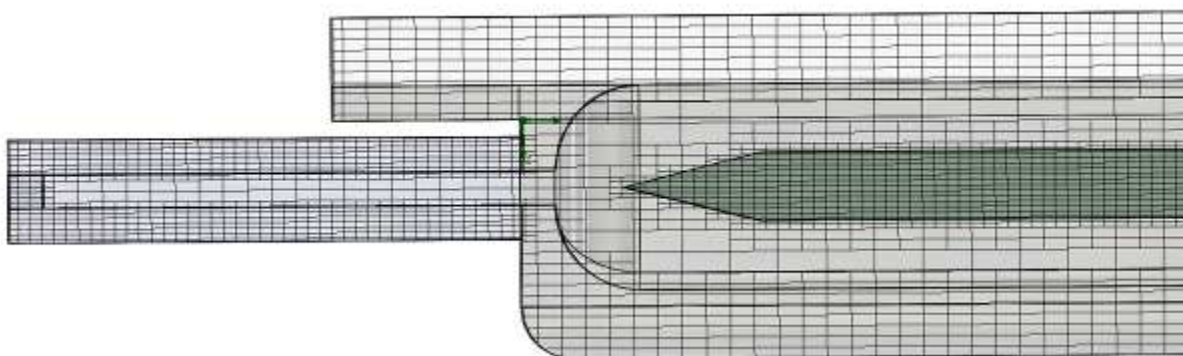
Povrch skleněné desky: nastavená intenzita teploty na povrch: **15000 W/m<sup>2</sup>**

|                                       | Maximální    | Minimální | Průměrná | Celkový průměr | Objem [m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------------------|--------------|-----------|----------|----------------|-------------------------|
| Teplota na fotovoltaickém článku [°C] | <b>26,76</b> | 20,07     | 20,2     | <b>20,2</b>    | 2,9E-05                 |

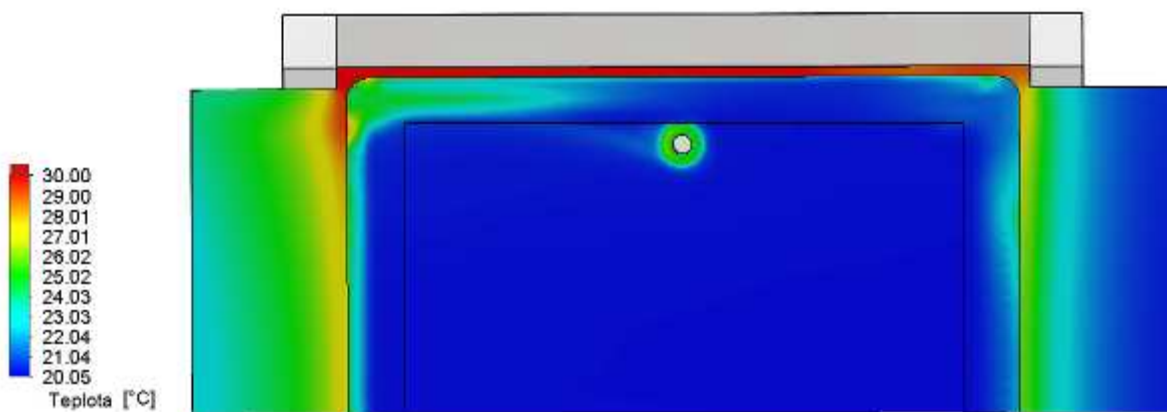
Tabulka 8: Výsledná teplota na fotovoltaickém článku ve vanovém modelu



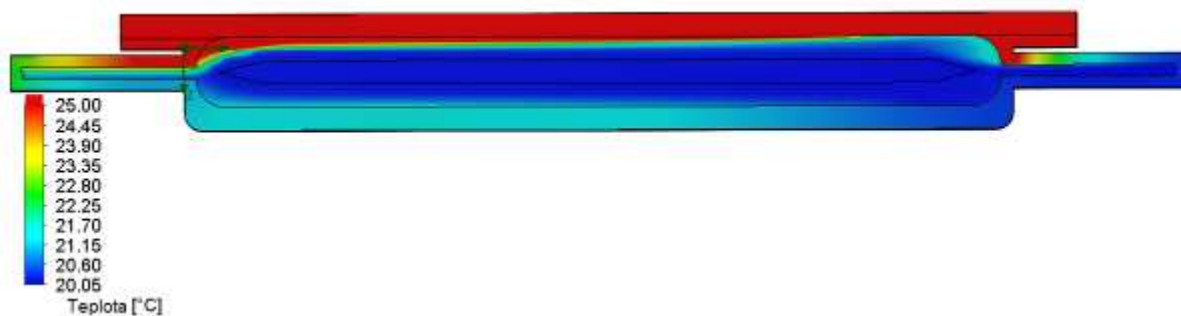
Obr. 6-37: Nastavená výpočetní síť pro vanový model



Obr. 6-38: Detail nastavené výpočetní sítě vanového modelu

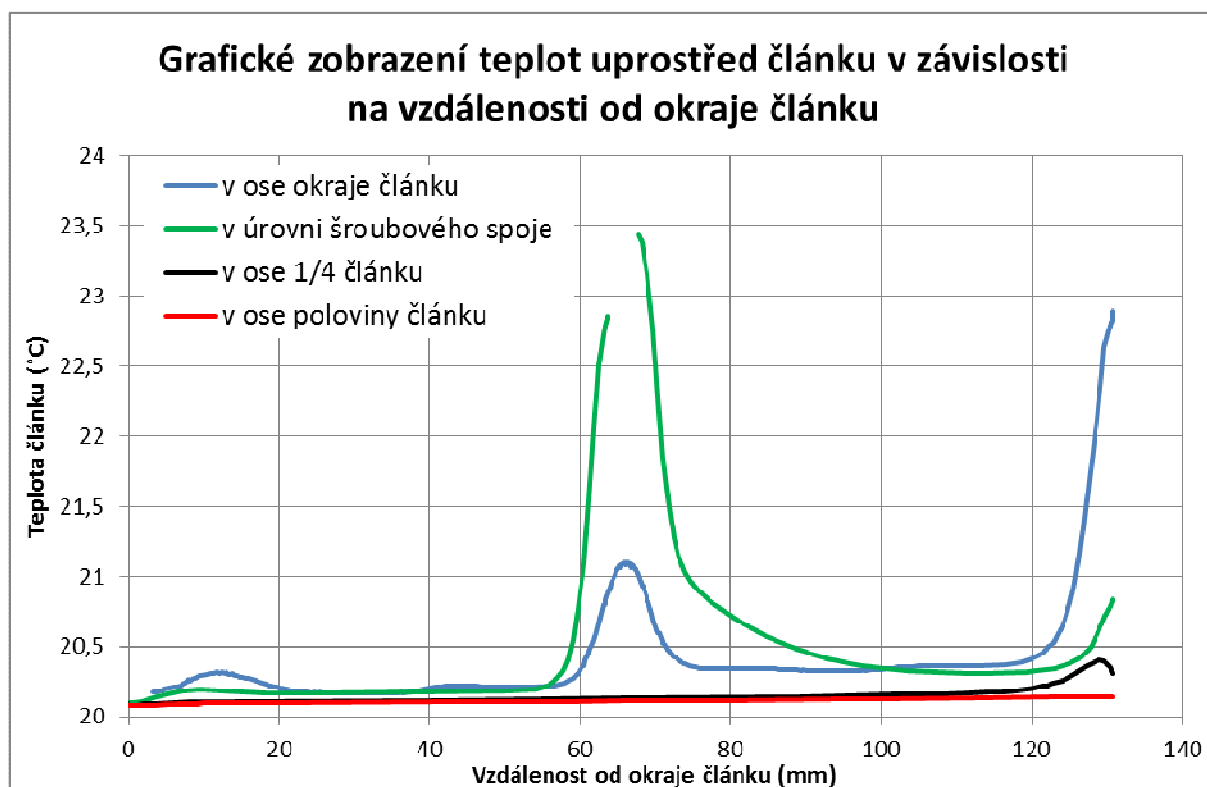


Obr. 6-39: Simulace zahřívání na vanovém modelu, pohled ze shora



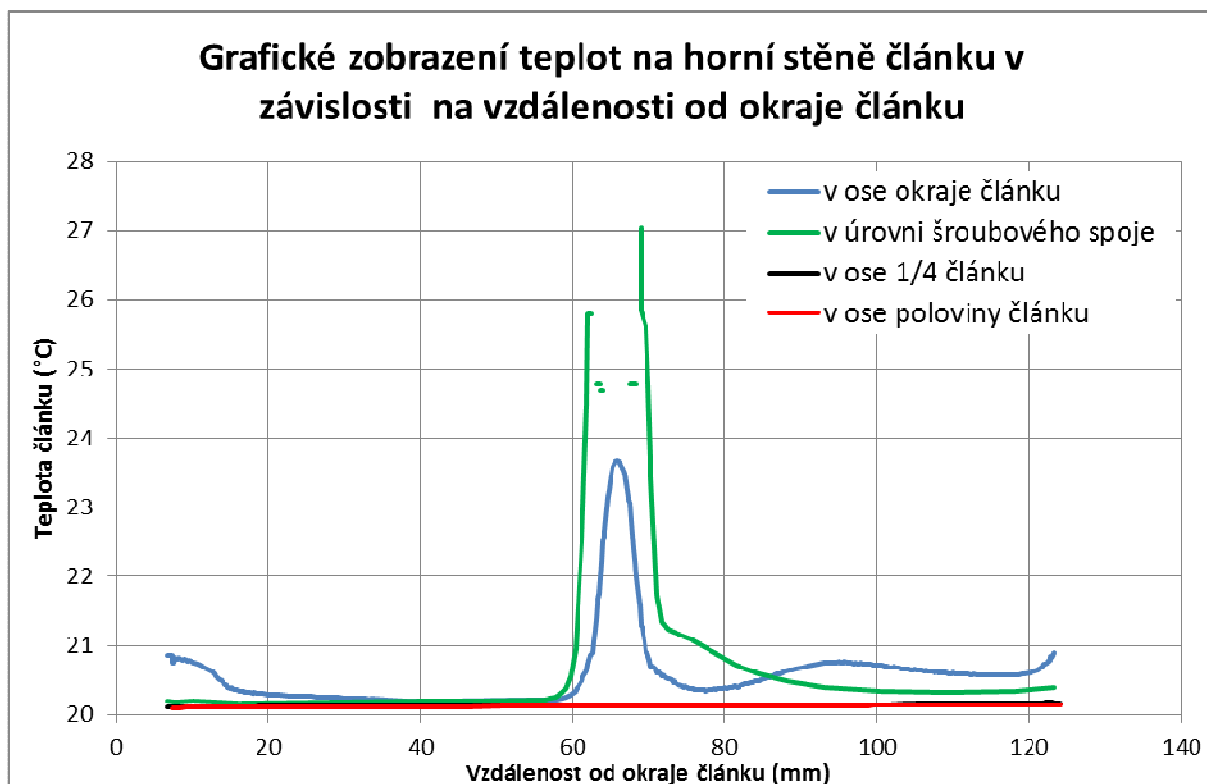
Obr. 6-40: Simulace zahřívání na vanovém modelu

Výsledné teplotní hodnoty na fotovoltaickém článku jsou uvedeny v Tabulka 8. Maximální teplota je oproti průměrné dosti vysoká, a to 26,76°C. Na Obr. 6-39 je vidět příčina vzniku, kde vysoká teplota na fotovoltaickém článku vzniká pod válcovým náhubkem, který byl přidán. Obr. 6-42, který ukazuje teplotní děj na horní stěně článku, dokládá, že v šroubovém spoji se vyskytuje největší teplotní rozdíl od průměrné hodnoty v celém článku. Dalším problematickým místem jsou hory článku při straně výstupu média. Ostatní teplotní rozložení na fotovoltaickém článku je velmi uspokojivé.

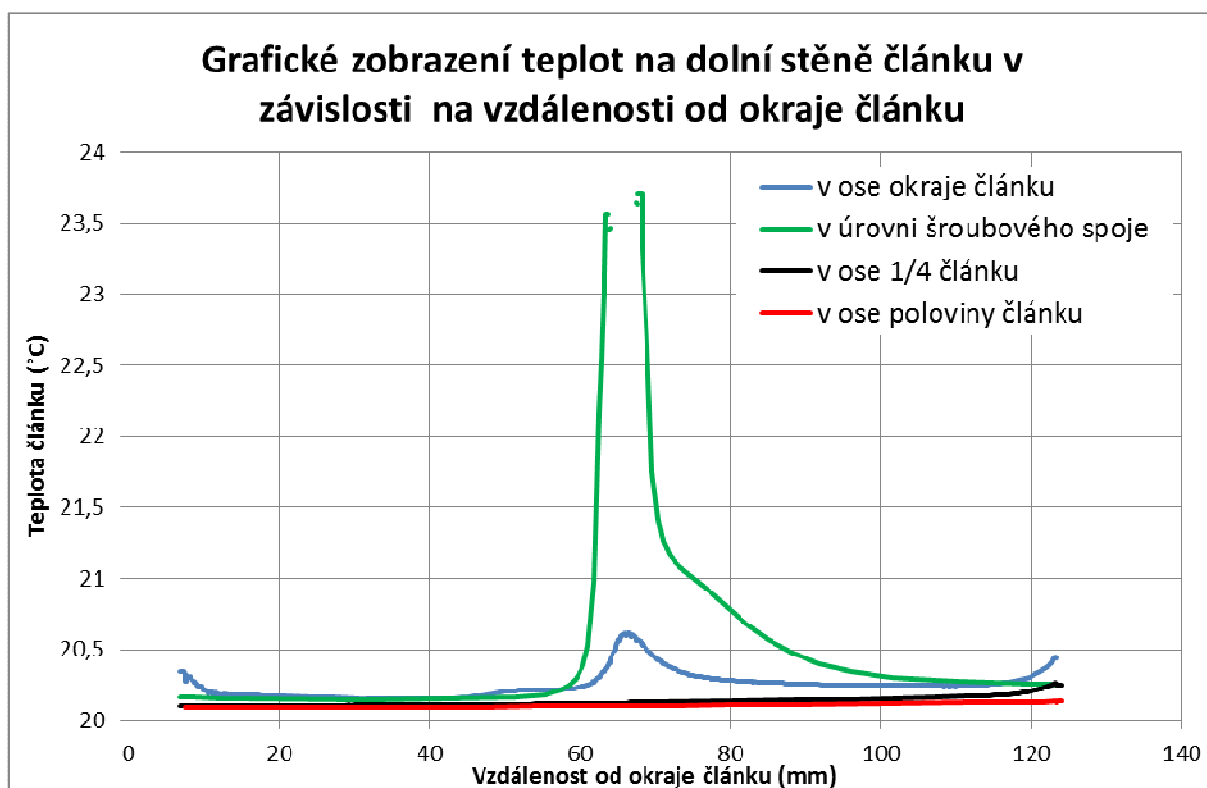


Obr. 6-41: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vanovém modelu

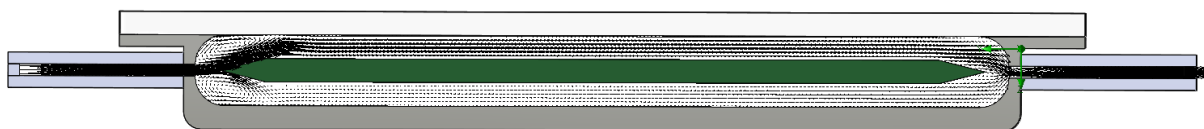




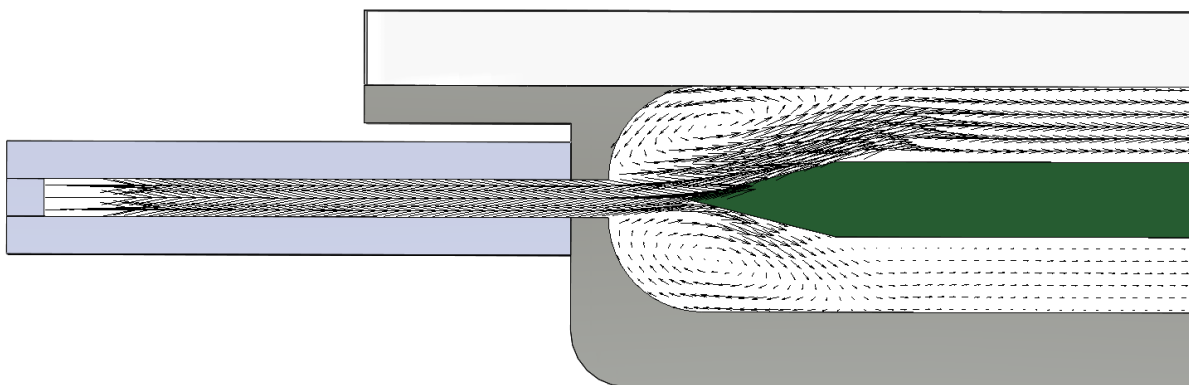
Obr. 6-42: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vanovém modelu



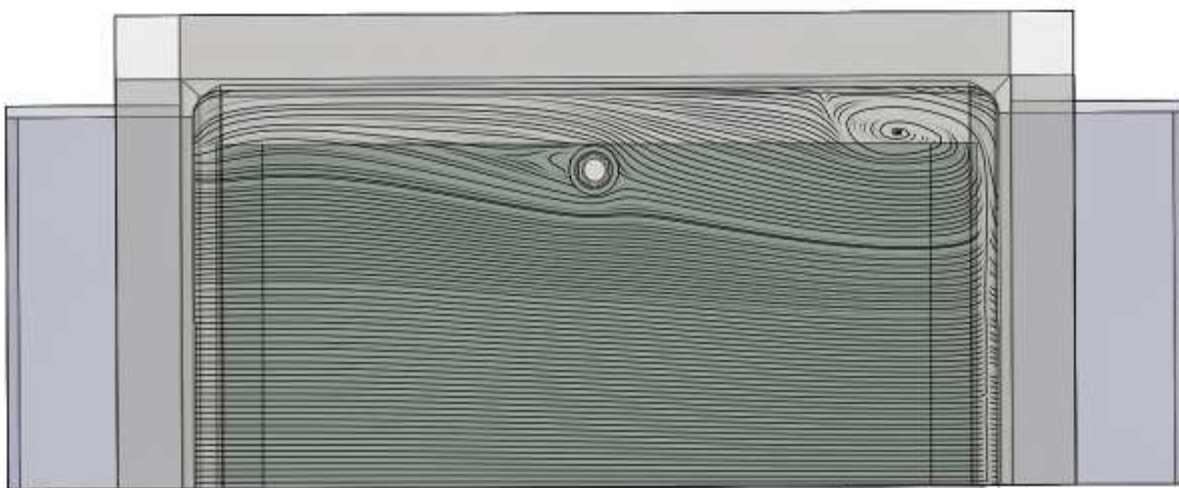
Obr. 6-43: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve vanovém modelu



**Obr. 6-44: Simulace proudění na vanovém modelu**

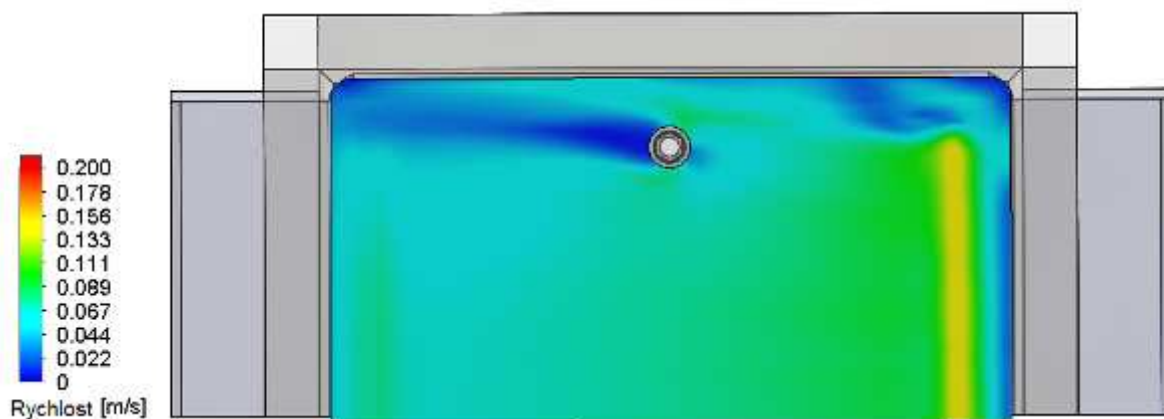


**Obr. 6-45: Detail proudění na vanovém modelu**

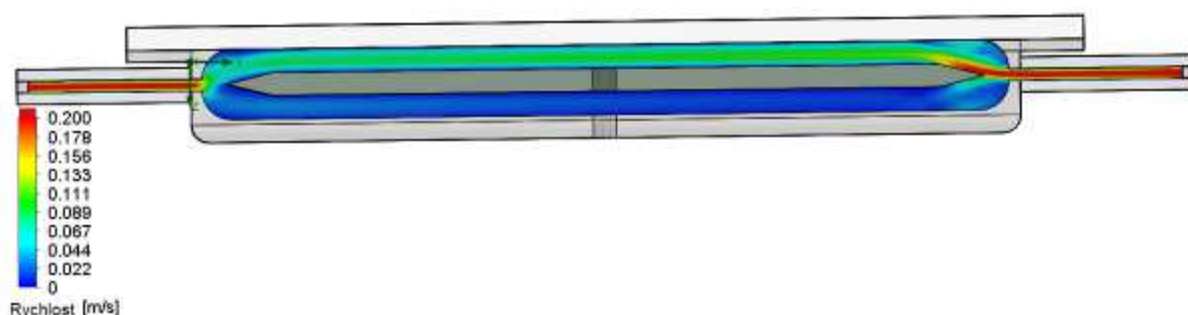


**Obr. 6-46: Simulace proudění na vanovém modelu, pohled ze shora**

Na Obr. 6-46 vidíme, že přidaný válcový náhubek, za účelem zániku víru kolem šroubu, splnil částečně. V celkovém rozložení vzniku víru ve vzdálenosti 1 mm nad fotovoltaickým článkem je mnohem uspokojivější oproti optimalizovanému vysavačovému modelu. Přesto vzniku vírů se v tomto modelu nepodařilo plně zamezit. Obr. 6-45 ukazuje vznik vírů v rohách vany při vstupu chladicího média.



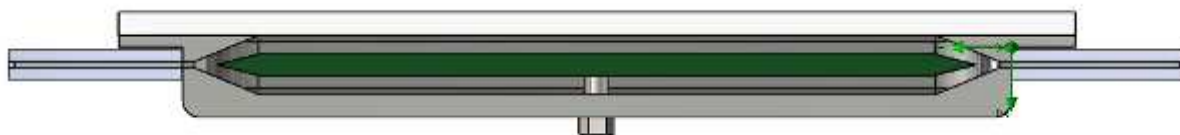
Obr. 6-47: Simulace rychlosti proudění média na vanovém modelu, pohled ze shora



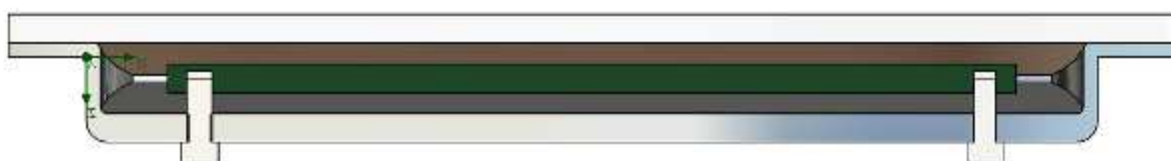
Obr. 6-48: Simulace rychlosti proudění média na vanovém modelu

## 6.5 Výsledný model

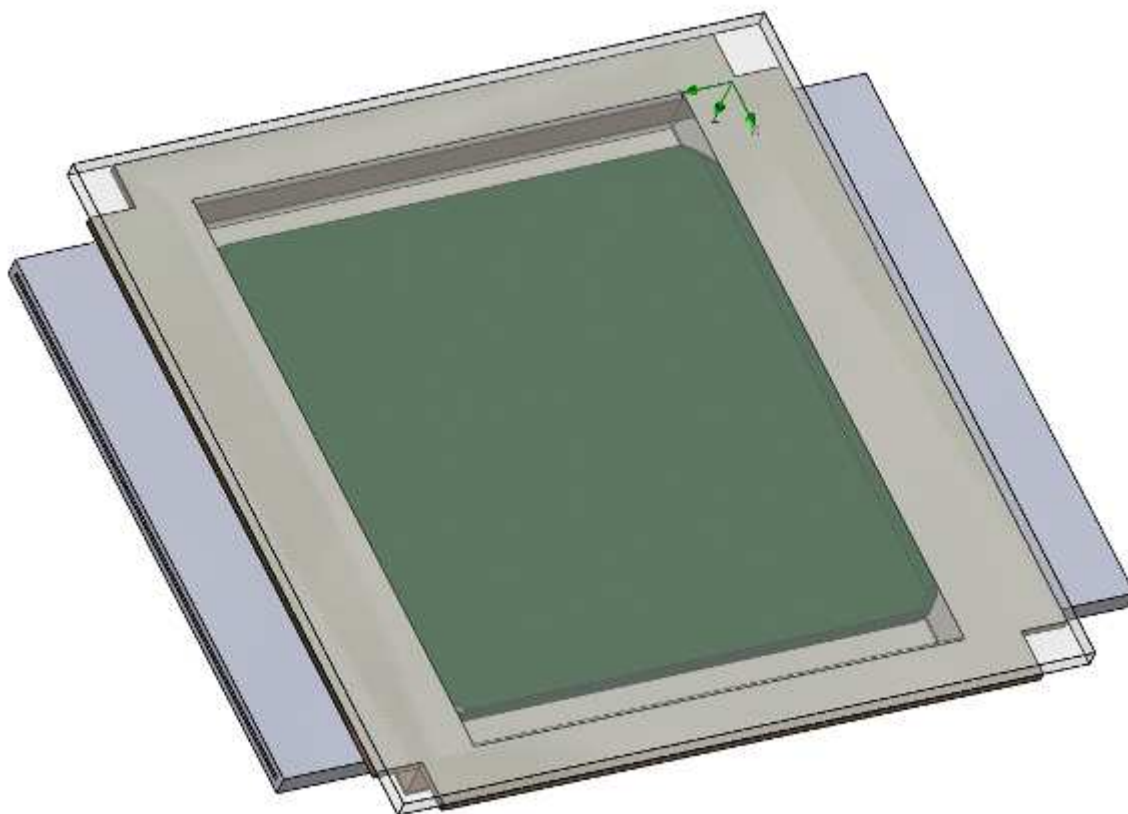
Z předchozích výsledků simulací bylo upraveno uchycení fotovoltaického článku v modelu. Šroub vchází ze spodní strany modelu a je našroubován jen do části fotovoltaického článku (Obr. 6-50). Vana byla ještě o 2 mm snížena. Místo zaoblených hran v rozích vany byly vytvořeny zkosené hrany. Fotovoltaickému článku byly zaobleny rohy. Vstupní i výstupní vysavačový přívod byl zmenšen na 1 x 130 mm. Celý model je zobrazen na Obr. 6-51.



Obr. 6-49: Výsledný model v řezu



Obr. 6-50 Výsledný model, uchycení fotovoltaického článku



Obr. 6-51: Výsledný model

#### Okrajové podmínky:

Vstup chladícího média: objemový tok: 1,5 l/min (25 ml/s) = **0,000025 m<sup>3</sup>/s**,  
teplota **20.05 °C**

Výstup chladícího média: výtok do atmosféry – statický tlak: **101325 Pa**

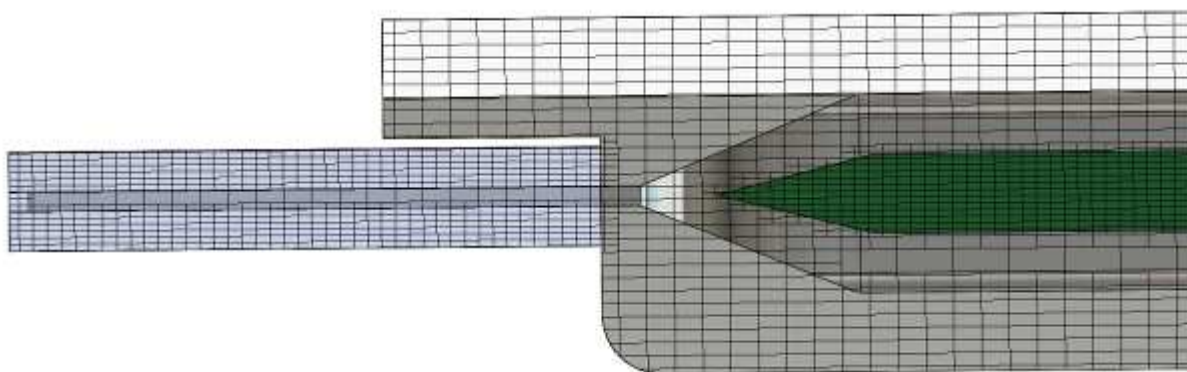
Povrch skleněné desky: nastavená intenzita teploty na povrch: **15000 W/m<sup>2</sup>**

|                                       | Maximální    | Minimální | Průměrná | Celkový průměr | Objem [m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------------------|--------------|-----------|----------|----------------|-------------------------|
| Teplota na fotovoltaickém článku [°C] | <b>23,08</b> | 20,24     | 20,51    | <b>20,51</b>   | 2,9E-05                 |

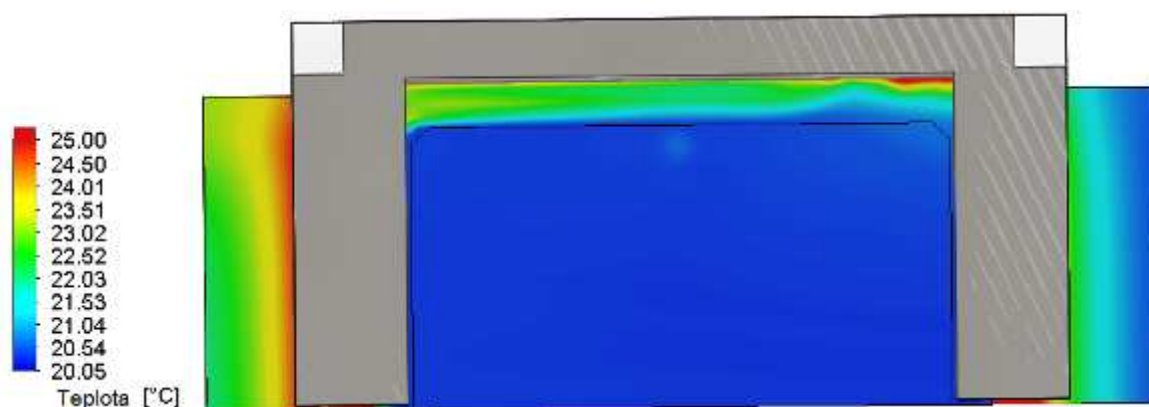
Tabulka 9: Výsledná teplota fotovoltaického článku na výsledném modelu



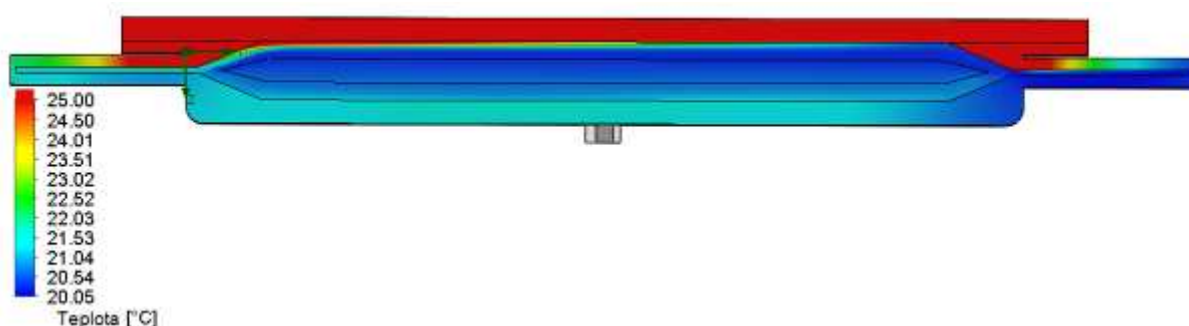
Obr. 6-52: Nastavená výpočetní síť pro výsledný model



**Obr. 6-53: Detail nastavené výpočetní sítě výsledného modelu**

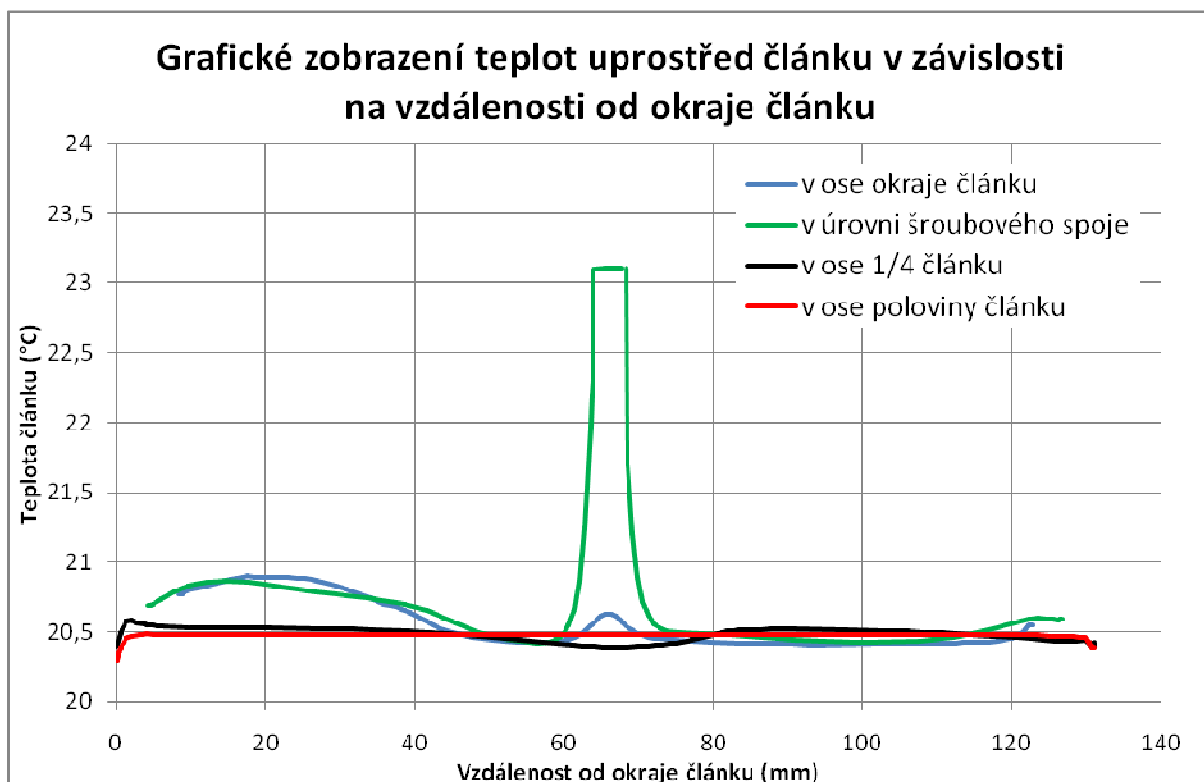


**Obr. 6-54: Simulace zahřívání na výsledném modelu, pohled ze shora**

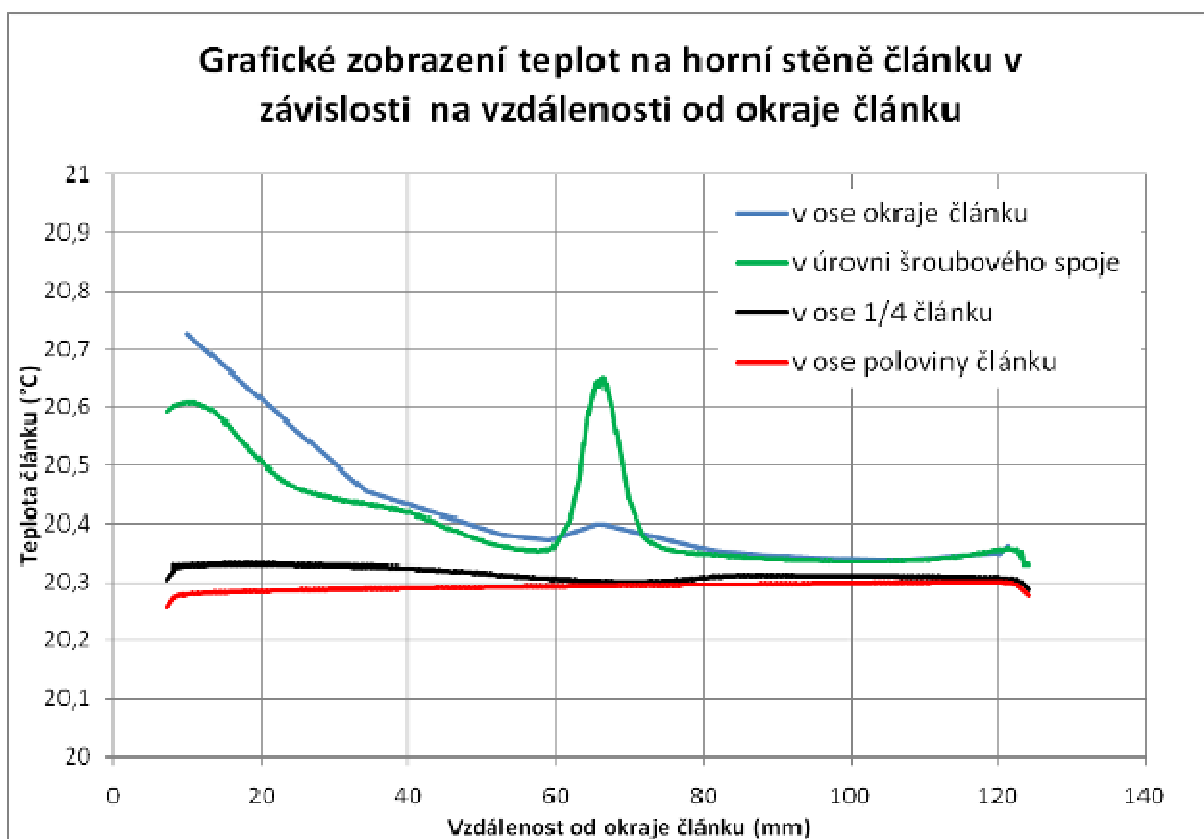


**Obr. 6-55: Simulace zahřívání na výsledném modelu**

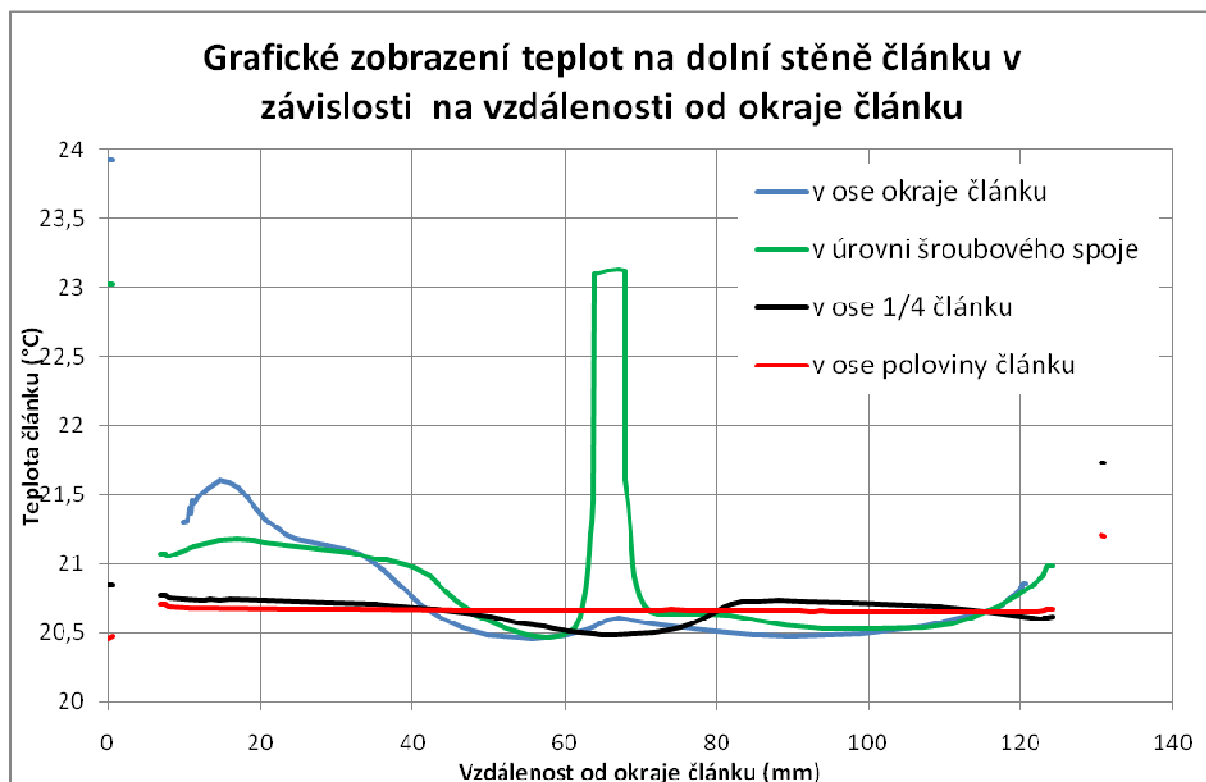
Teplotní výsledek simulace je zobrazen na Obr. 6-56, Obr. 6-57, Obr. 6-58, Obr. 6-54 a Obr. 6-55. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 9. V tomto výsledném modelu fotovoltaický článek vykazuje velmi uspokojivé výsledky. Článek je uchlazen konstantně, nezaznamenává žádné velké teplotní výkyvy. Problémové místa na fotovoltaickém článku jsou jednotlivé rohy a oblast kolem úchytného šroubu. Teplotní výsledky na straně přítoku média jsou řádově o 0,5°C vyšší, oproti ostatním oblastem krom zmiňovaného šroubového spoje. Spoj vykazuje ještě o něco vyšší teplotní hodnoty.



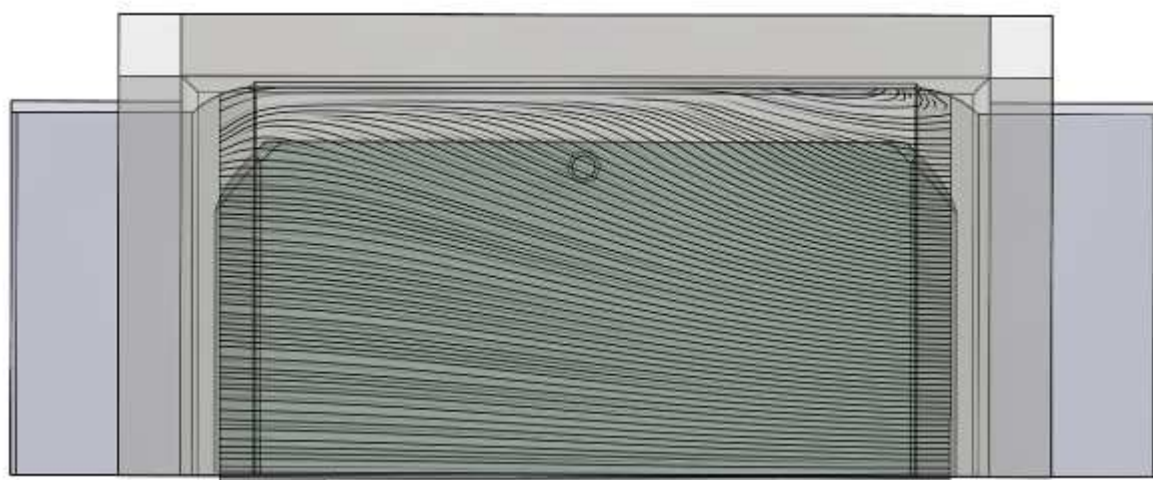
**Obr. 6-56: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu**



**Obr. 6-57: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu**



**Obr. 6-58: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu**

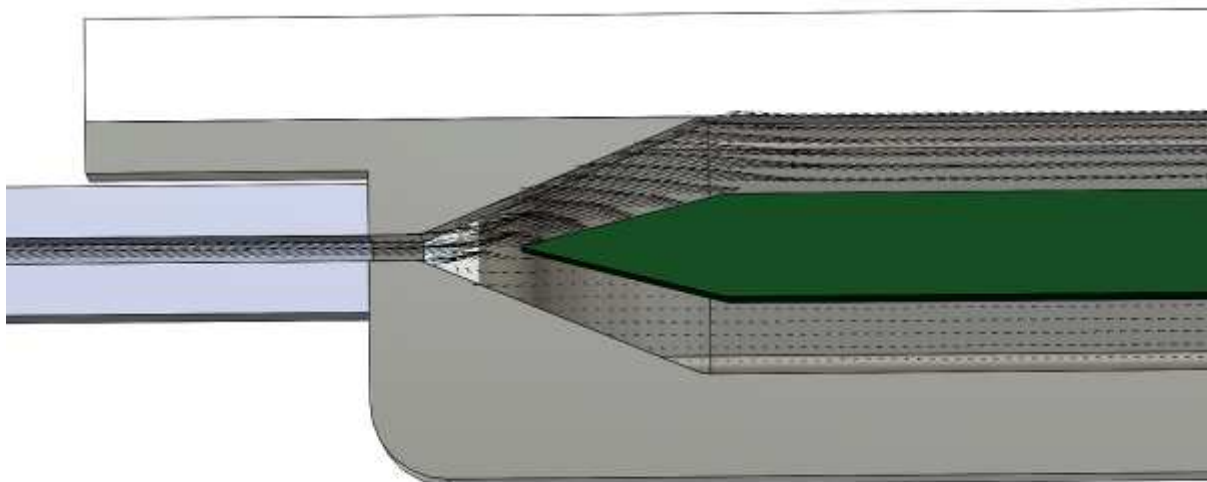


**Obr. 6-59: Simulace proudění na výsledném modelu, pohled ze shora**



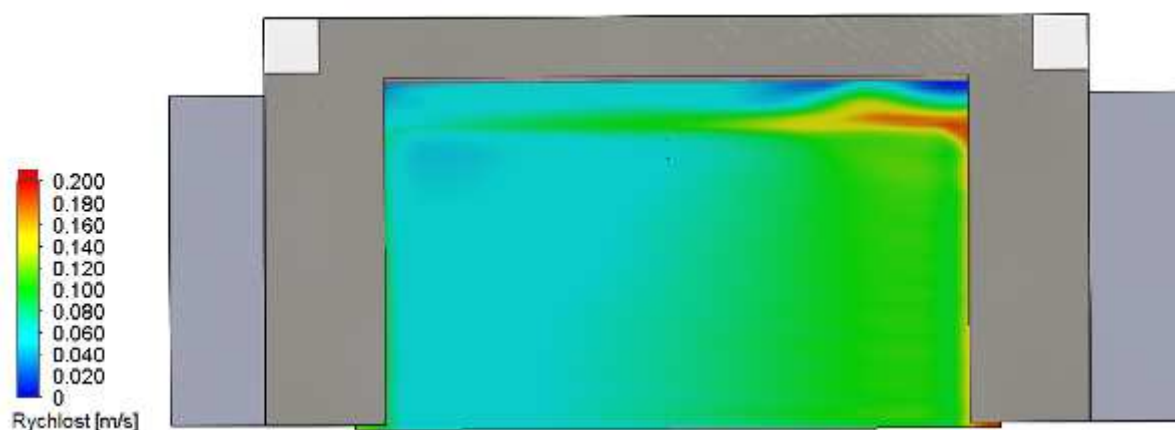
**Obr. 6-60: Simulace proudění na výsledném modelu**



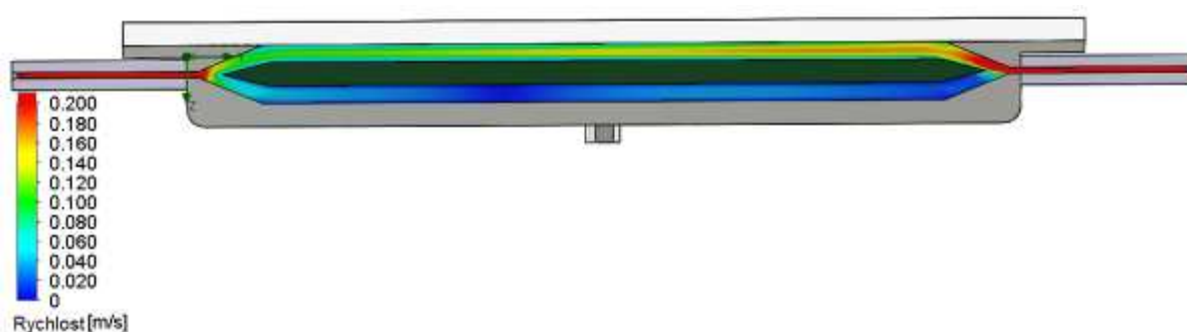


**Obr. 6-61: Detail proudění na výsledném modelu**

Obrázky Obr. 6-60 a Obr. 6-61 dokládají zamezení vírů při vstupu chladicího média, v rohách vany již voda „nestojí“. Obrázek (Obr. 6-59) ukazuje simulaci proudění ve vzdálenosti 0,5 mm nad fotovoltaickým článkem, který nám dokládá zánik víru nad samotným článkem. Na obrázcích (Obr. 6-62 a Obr. 6-63) je patrné, že rychlost není konstantní, ale nezpůsobuje to nepříznivé chlazení fotovoltaického článku.



**Obr. 6-62: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu, pohled ze shora**



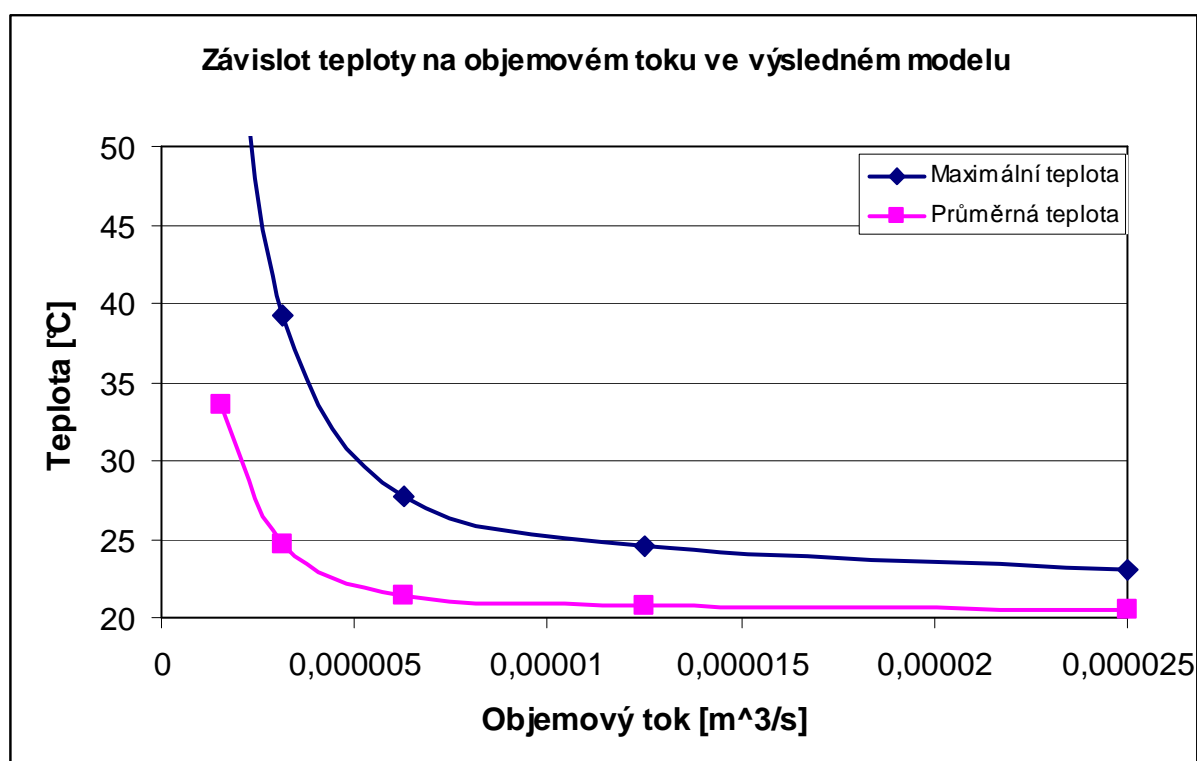
**Obr. 6-63: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu**



Výsledný model byl podroben simulacím při snižování objemového toku, výsledky jsou uvedeny v Tabulka 10. Výsledky jsou graficky zpracovány v Obr. 6-64. Na základě grafické závislosti byl určen doporučený objemový tok vstupního chladícího média (voda) 0,00000625 [m<sup>3</sup>/s] nebo-li 6,25 ml/s. V dalším snižování objemového toku chladícího média začne prudce stoupat teplota fotovoltaického článku.

| verze        | objemový tok [m <sup>3</sup> /s] | teplota fotovoltaického článku [°C] |           |          |
|--------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------|----------|
|              |                                  | maximální                           | minimální | průměrná |
| Výsledný_pr2 | 0,000025                         | 23,08                               | 20,24     | 20,51    |
| Výsledný_pr3 | 0,0000125                        | 24,56                               | 20,31     | 20,76    |
| Výsledný_pr4 | 0,00000625                       | 27,78                               | 20,62     | 21,45    |
| Výsledný_pr5 | 3,125E-06                        | 39,29                               | 21,39     | 24,64    |
| Výsledný_pr6 | 1,5625E-06                       | 65,33                               | 23,38     | 33,53    |

Tabulka 10: Srovnání výsledného modelu s různými objemovými toky



Obr. 6-64: Grafická závislost teploty na objemovém toku ve výsledném modelu

## 6.6 Výsledný model s doporučeným objemovým tokem

### Okrajové podmínky:

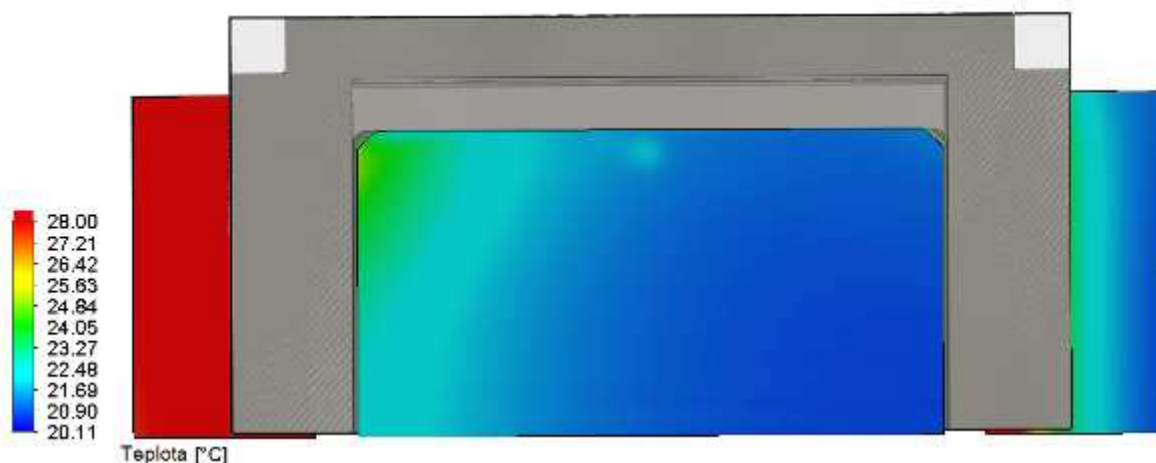
Vstup chladicího média: objemový tok: 0,375 l/min (6,25 ml/s) = **0,00000625 m<sup>3</sup>/s**,  
teplota **20.05 °C**

Výstup chladicího média: výtok do atmosféry – statický tlak: **101325 Pa**

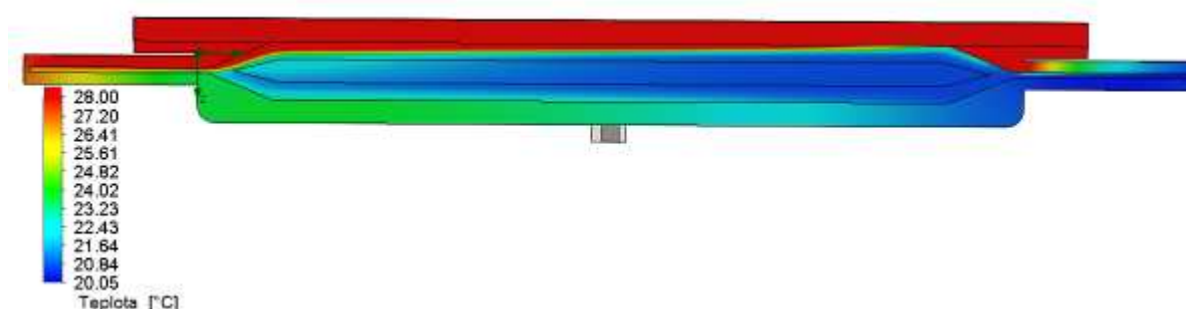
Povrch skleněné desky: nastavená intenzita teploty na povrch: **15000 W/m<sup>2</sup>**

|                                       | Maximální    | Minimální | Průměrná | Celkový průměr | Objem [m <sup>3</sup> ] |
|---------------------------------------|--------------|-----------|----------|----------------|-------------------------|
| Teplota na fotovoltaickém článku [°C] | <b>27,78</b> | 20,62     | 21,45    | <b>21,45</b>   | 2,9E-05                 |

Tabulka 11: Výsledná teplota fotovoltaického článku na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem



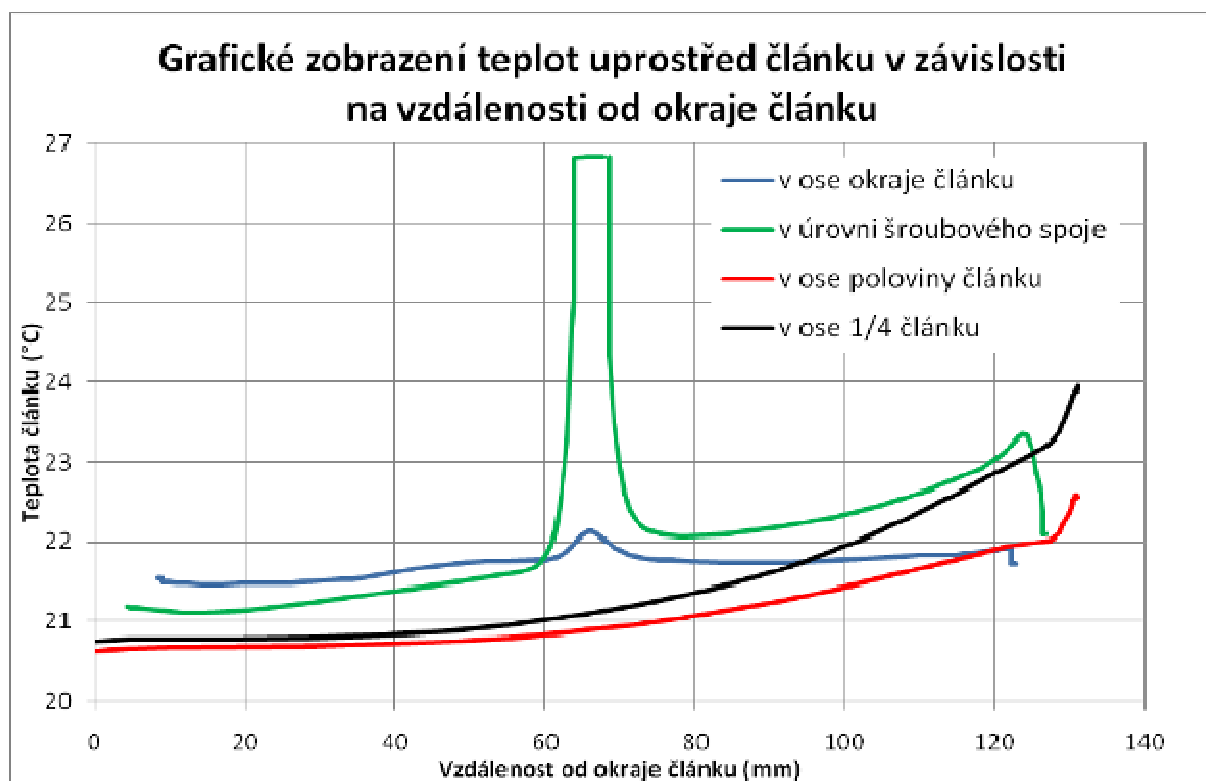
Obr. 6-65: Simulace zahřívání na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem, pohled ze shora



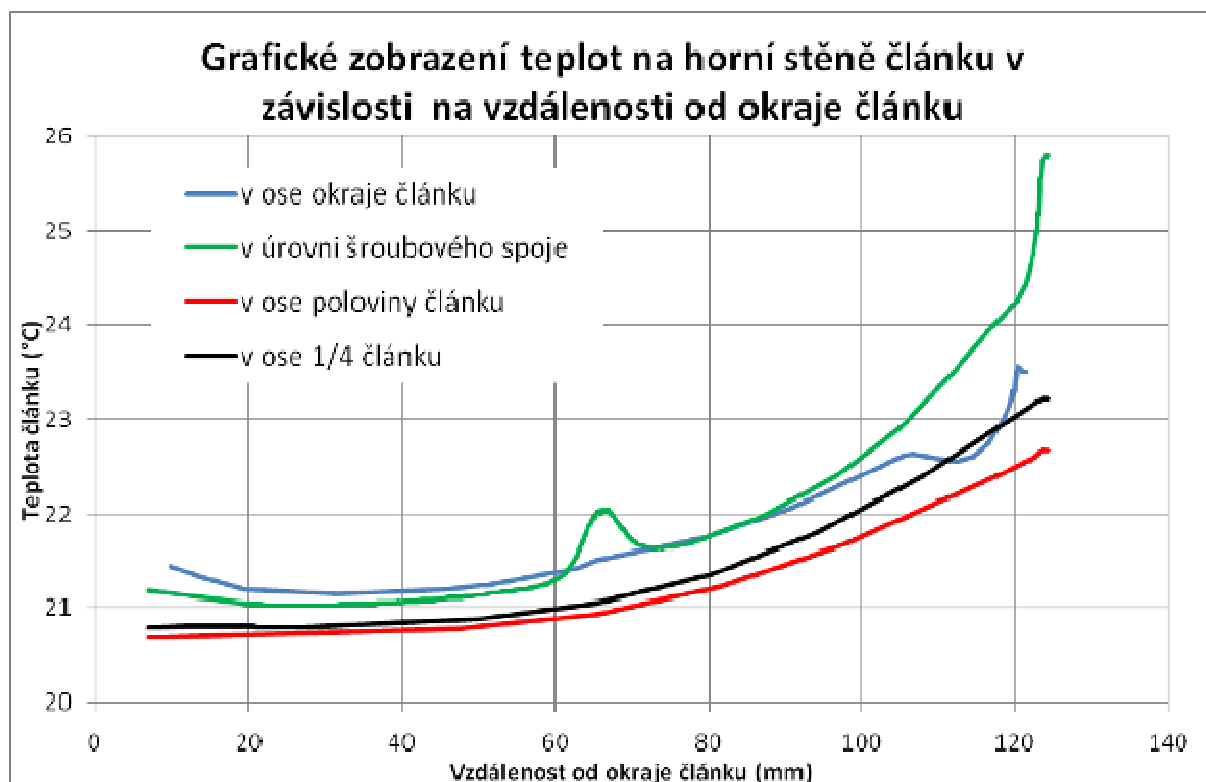
Obr. 6-66: Simulace zahřívání na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem

Na obrázcích Obr. 6-67, Obr. 6-68, Obr. 6-69, Obr. 6-65 a Obr. 6-66 je zobrazena simulace zahřívání na povrchu fotovoltaického článku. Na straně odtoku chladicího média je patrné, že teplota je vyšší než na straně přítoku. Je to způsobeno, že na straně odtoku je menší

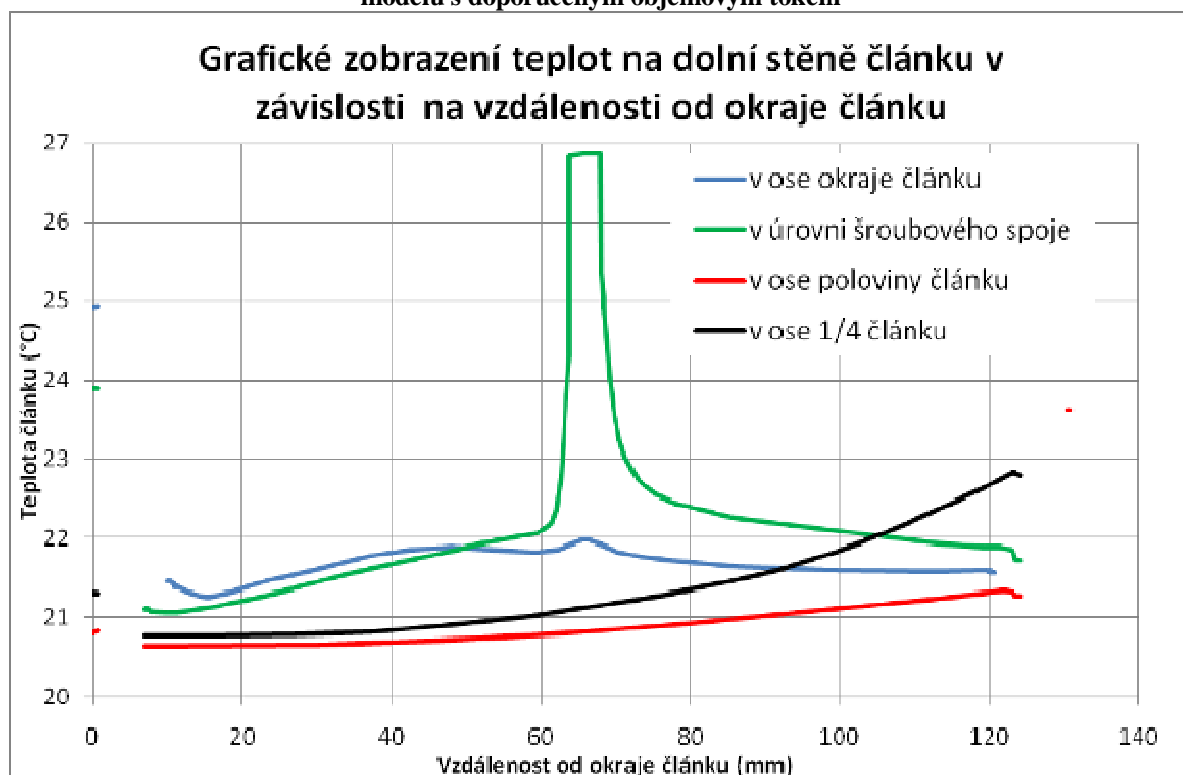
rychlost proudění chladicího média, což dokládají obrázky (Obr. 6-72 a Obr. 6-73). Z obrázku (Obr. 6-71 a Obr. 6-70) je vidět, že při tomto množství objemového toku se víry netvoří. Nejproblematictější chlazení je v oblasti šroubového spoje.



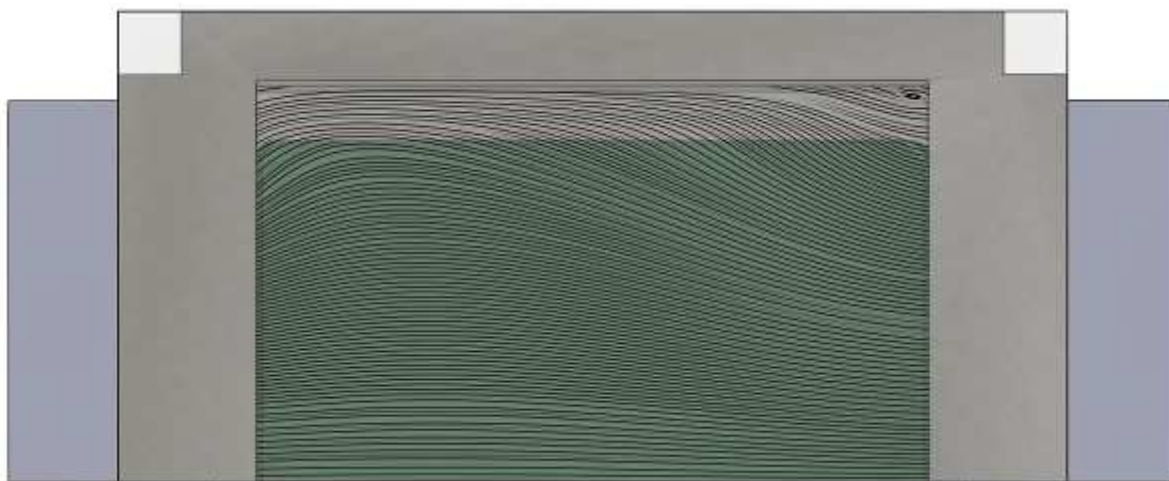
**Obr. 6-67: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem**



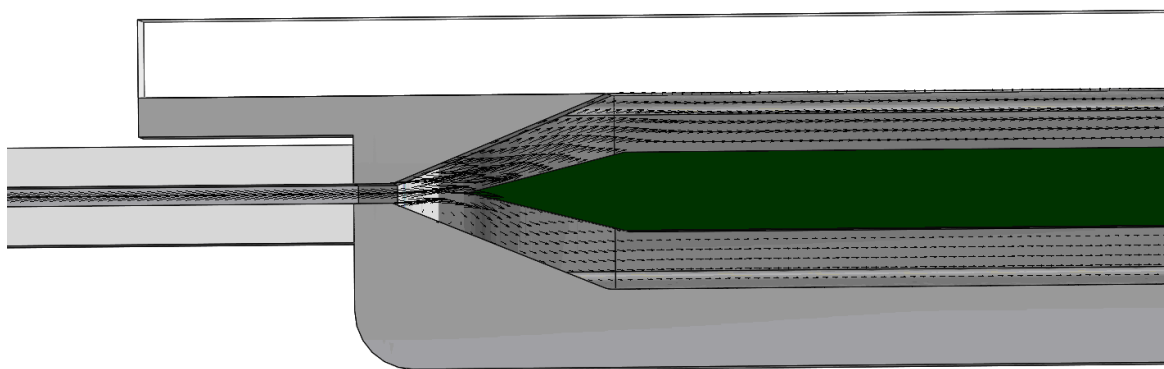
Obr. 6-68: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem



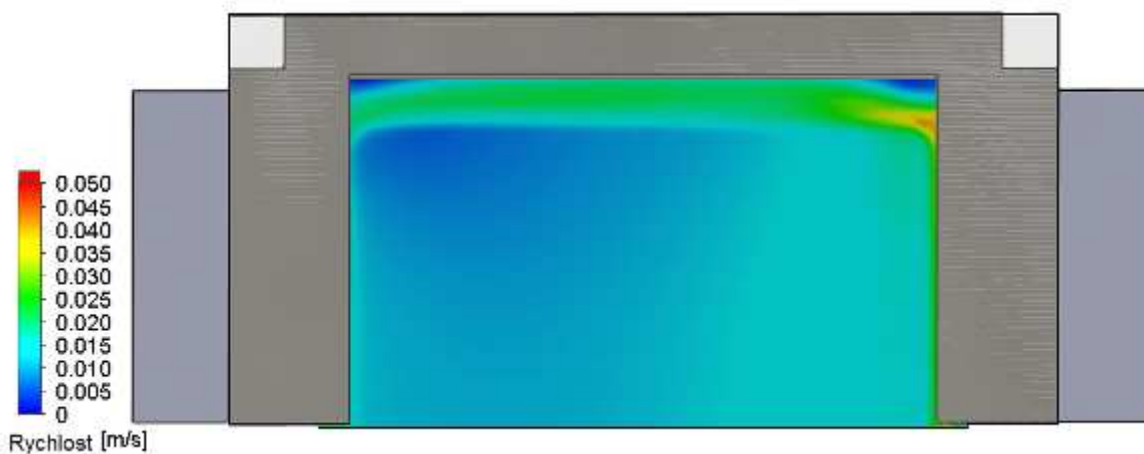
Obr. 6-69: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem



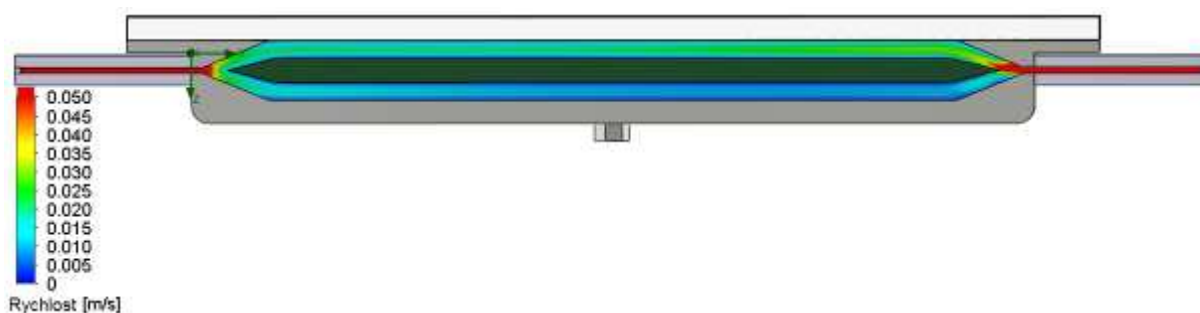
Obr. 6-70: Simulace proudění na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem, pohled ze shora



Obr. 6-71: Detail proudění na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem



Obr. 6-72: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem, pohled ze shora



Obr. 6-73: Simulace rychlosti proudění média na výsledném modelu s doporučeným objemovým tokem

## 6.7 Výsledný model s radiací

Tato simulace byla uskutečněna z důvodu schopnosti zahrnout plnohodnotně do analýzy také jevy, které souvisí s radiací. Jedná se o vyzařování nebo pohlcování energie.

### Okrajové podmínky:

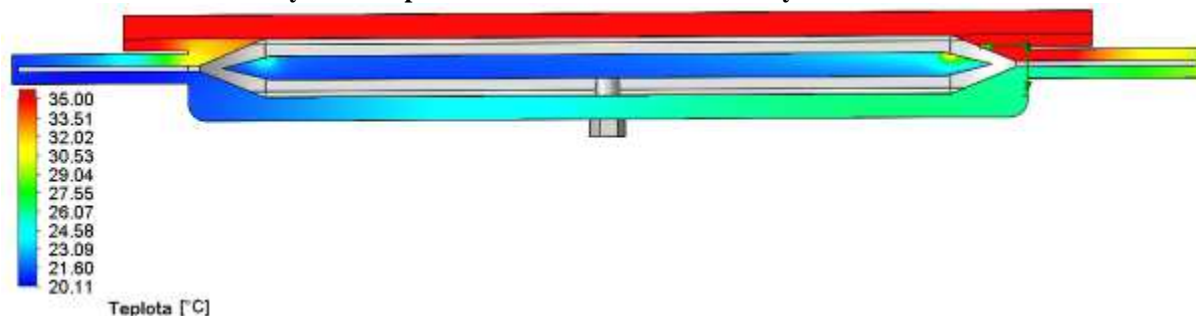
Vstup chladícího média: objemový tok: 0,375 l/min (6,25 ml/s) = **0,00000625 m<sup>3</sup>/s**,  
teplota **20.05 °C**

Výstup chladícího média: výtok do atmosféry – statický tlak: **101325 Pa**

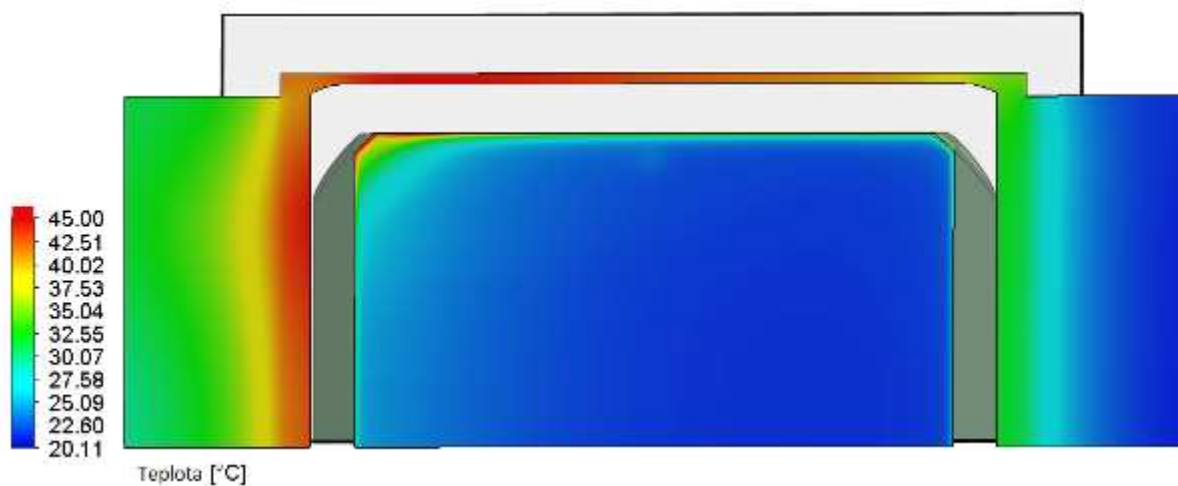
Povrch skleněné desky: nastavená intenzita teploty na povrch: **15000 W/m<sup>2</sup>**

|                                       | Maximální    | Minimální | Průměrná | Celkový průměr | Objem [m] |
|---------------------------------------|--------------|-----------|----------|----------------|-----------|
| Teplota na fotovoltaickém článku [°C] | <b>53,92</b> | 20,92     | 23,4     | <b>23,4</b>    | 2,90E-05  |

Tabulka 12: Výsledná teplota fotovoltaického článku na výsledném modelu s radiací

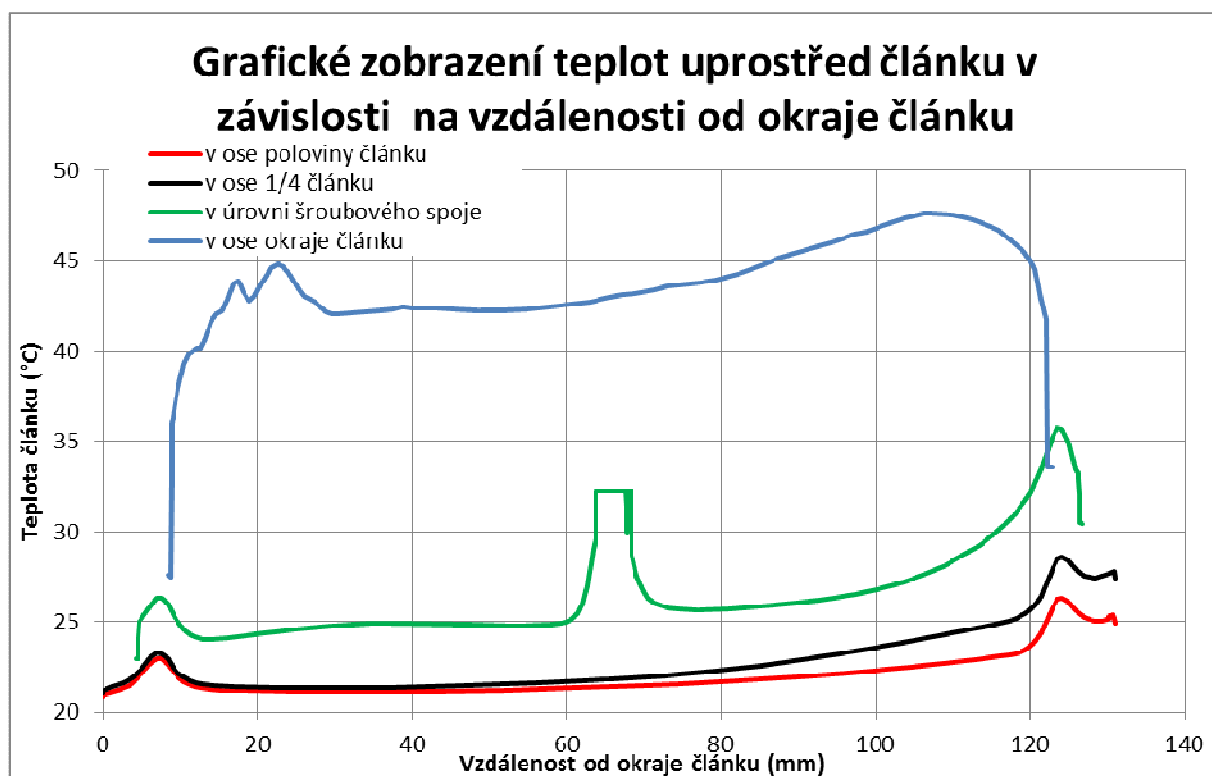


Obr. 6-74: Simulace zahřívání na výsledném modelu s radiací

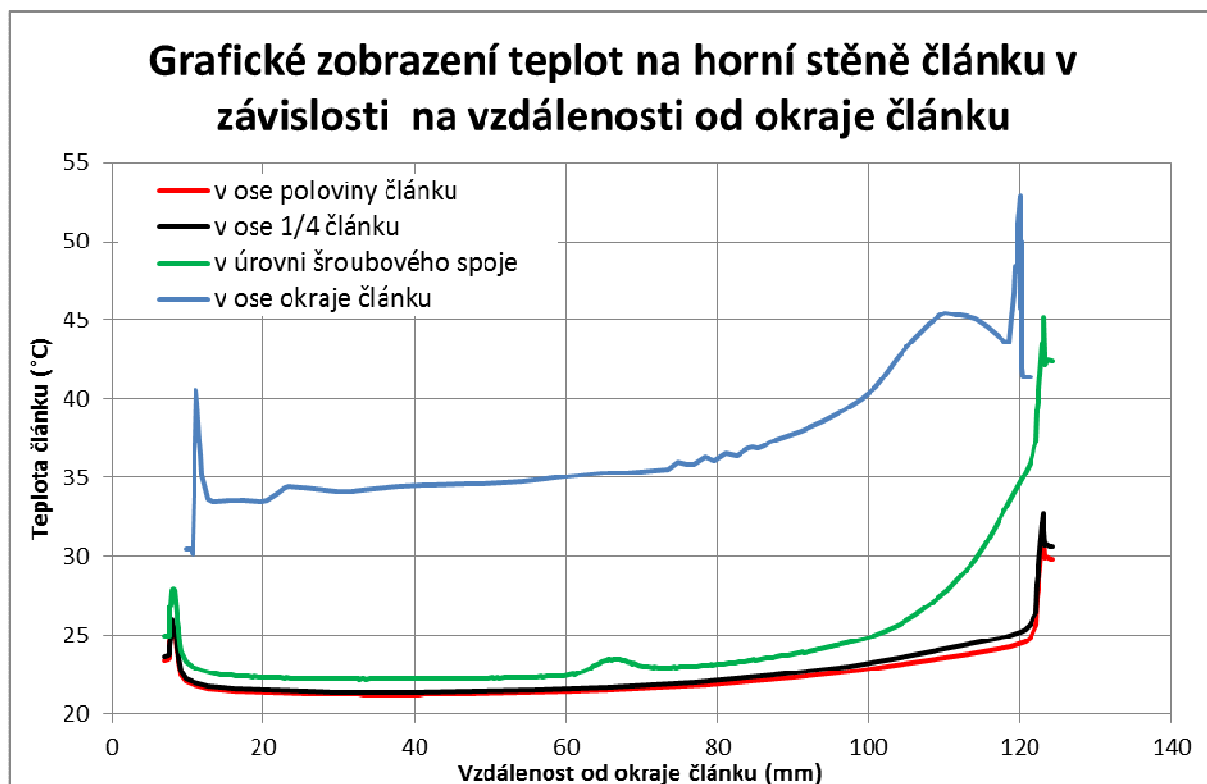


**Obr. 6-75: Simulace zahřívání na výsledném modelu s radiací, pohled ze shora**

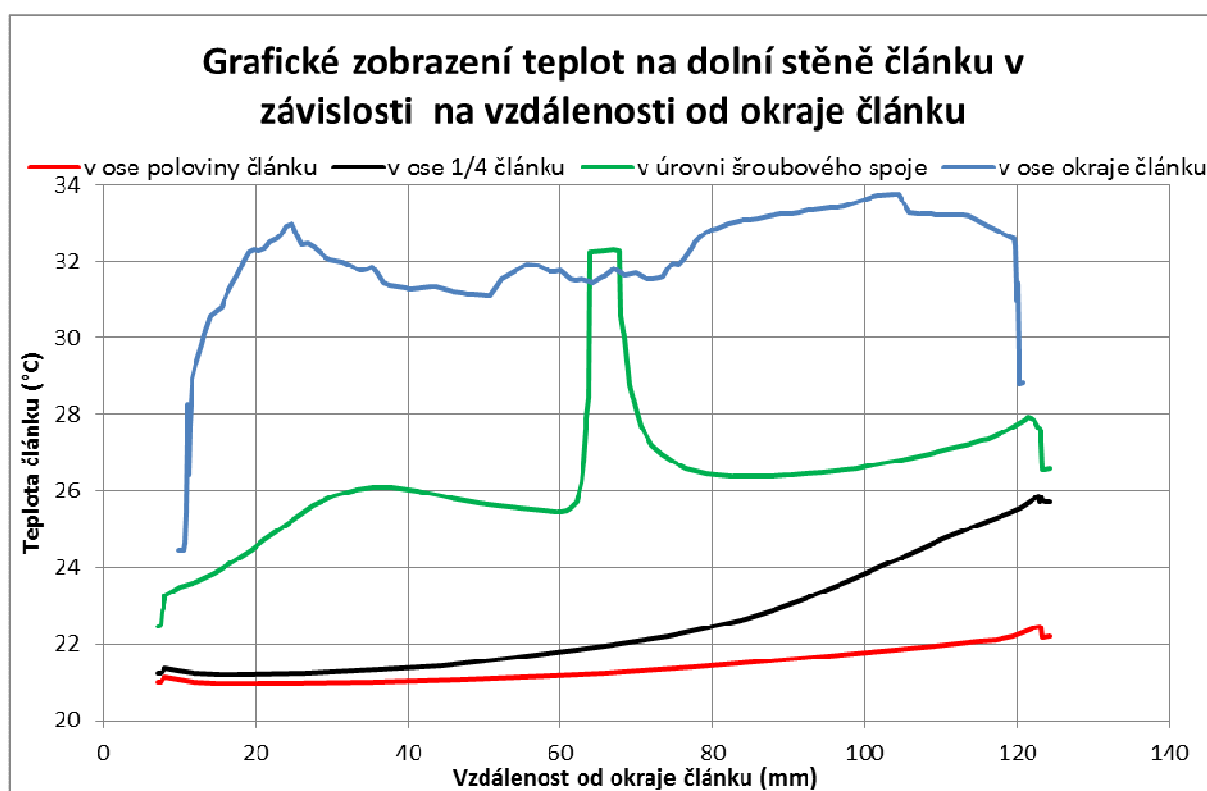
Na obrázcích Obr. 6-74, Obr. 6-75, Obr. 6-76, Obr. 6-77 a Obr. 6-78 vidíme teplotní výsledky simulace. V Tabulka 12 jsou uvedeny výsledné teplotní hodnoty. Chlazení je problematické na okrajích článku a v oblasti šroubového spoje. Krajiní zahřátí je extrémně vyšší než v ostatních částech článku, a to až o 20°C.



**Obr. 6-76: Teplotní závislost střední roviny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s radiací**



Obr. 6-77: Teplotní závislost horní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s radiací



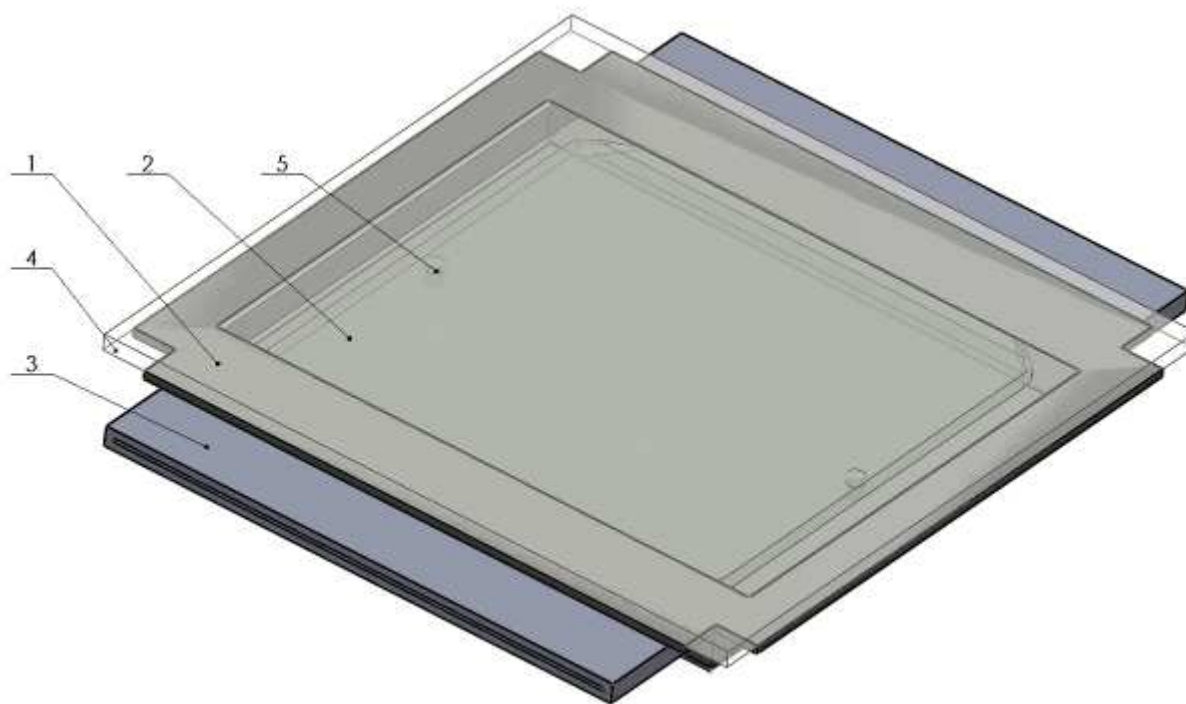
Obr. 6-78: Teplotní závislost dolní stěny článku na vzdálenosti od strany přítoku článku ve výsledném modelu s radiací



## 7 Výkresová dokumentace výsledného modelu

V této kapitole je uvedena výkresová dokumentace výsledného modelu. Na obrázku (Obr. 7-1) je uvedeno rozvržení jednotlivých částí výsledného modelu.

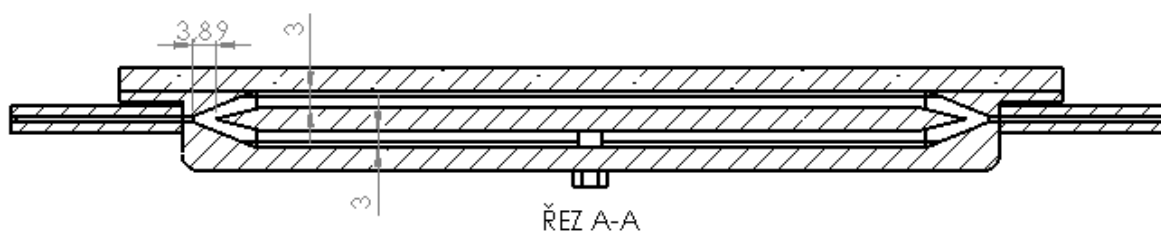
### 7.1 Výsledný model



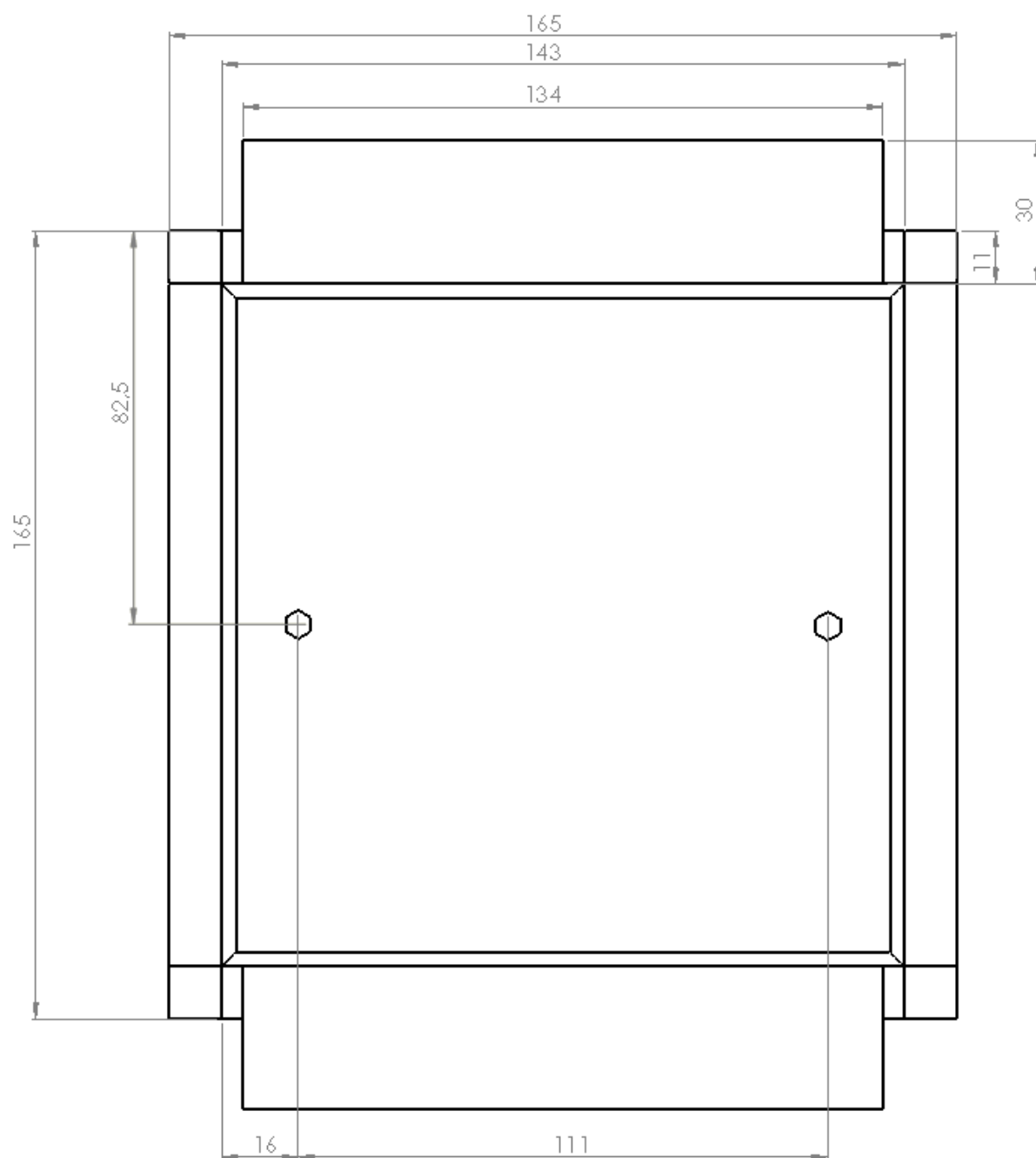
Obr. 7-1: Pozice jednotlivých částí výsledného modelu (1 – vana, 2 – fotovoltaický článek, 3 – přítoková trubka, 4 – sklo, 5 – šroub)



Obr. 7-2: Základní pohled – nárys výsledného modelu

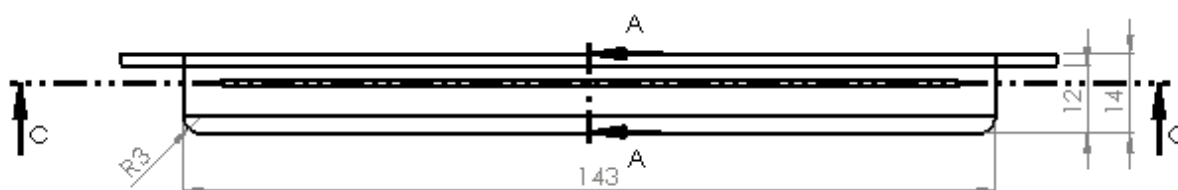


Obr. 7-3: Pohled řezu A-A výsledného modelu

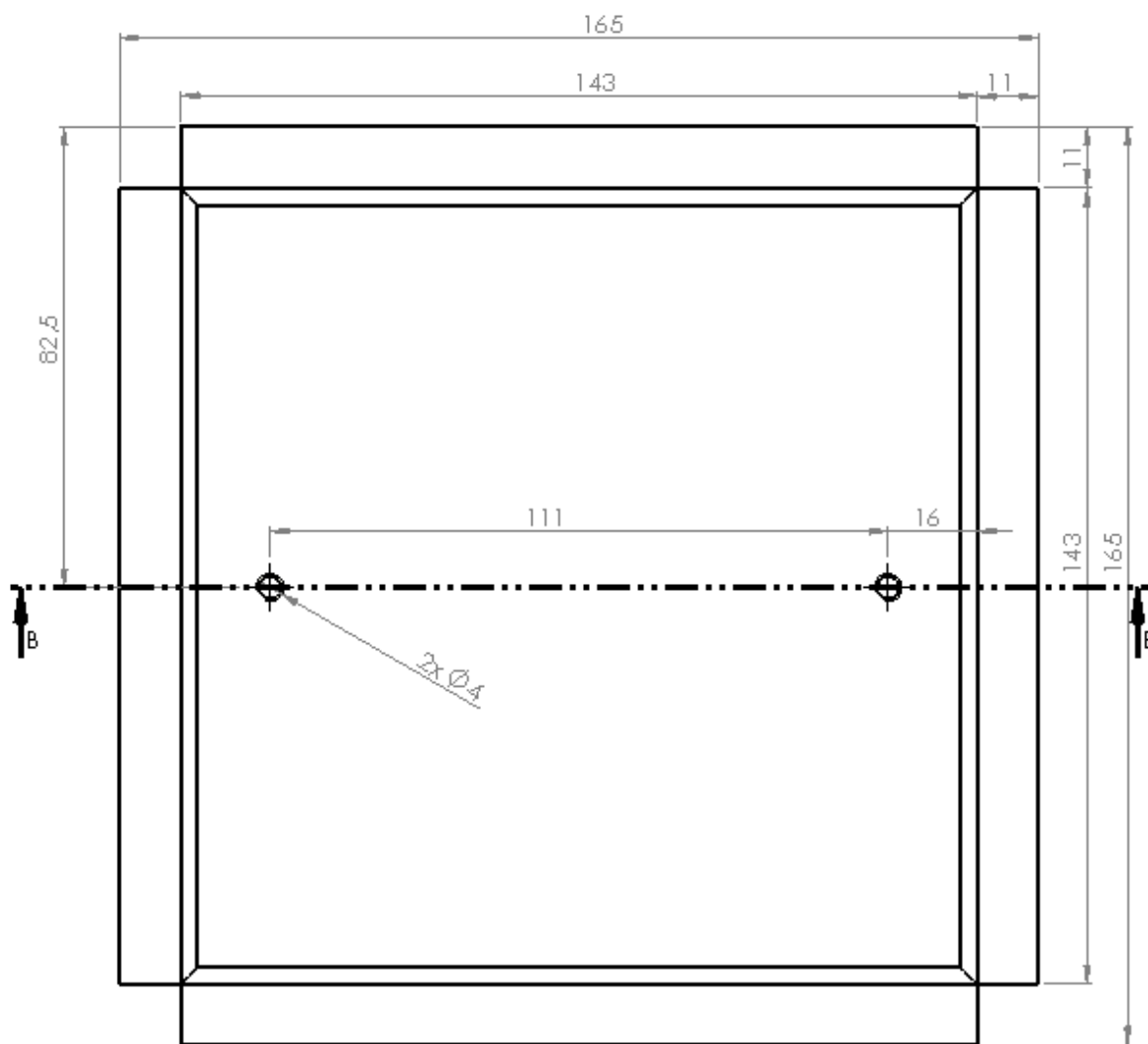


**Obr. 7-4: Půdorys výsledného modelu**

## 7.2 Vana



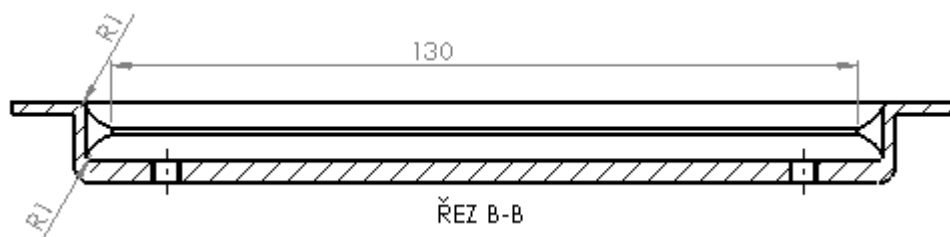
**Obr. 7-5: Nárys vany výsledného modelu**



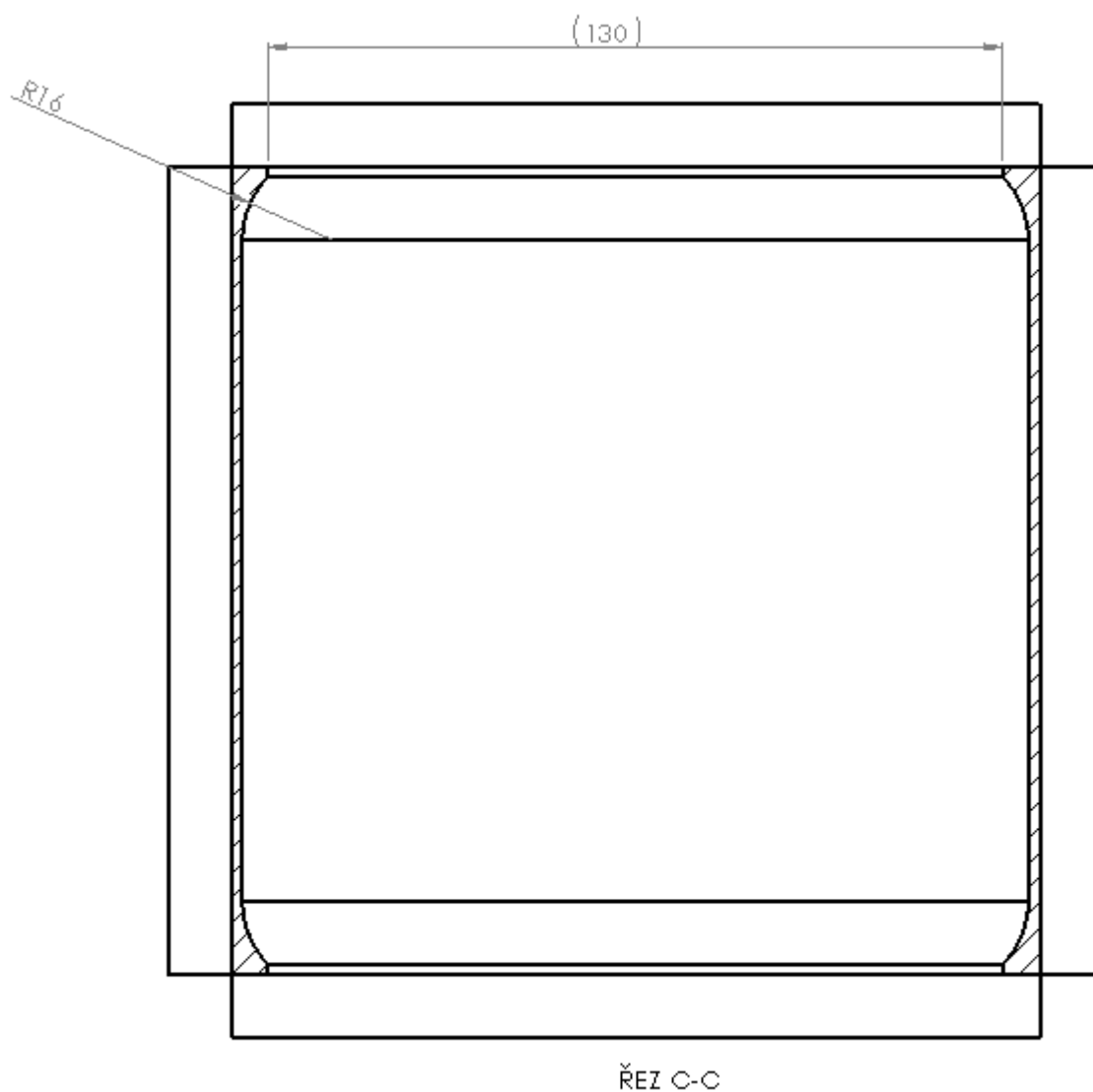
Obr. 7-6: Půdorys vany výsledného modelu



Obr. 7-7: Pohled řezu A-A vany

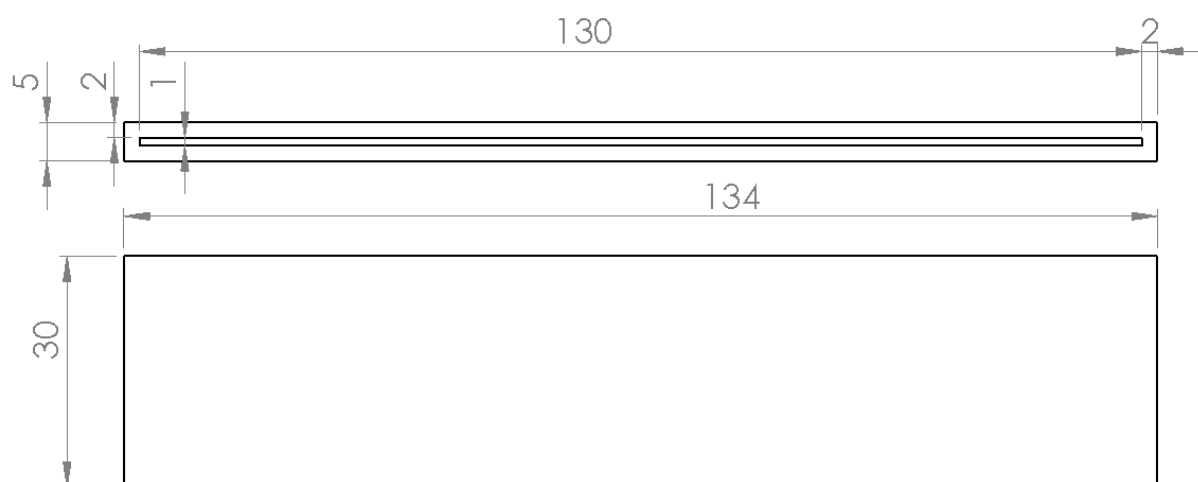


Obr. 7-8: Pohled řezu B-B vany



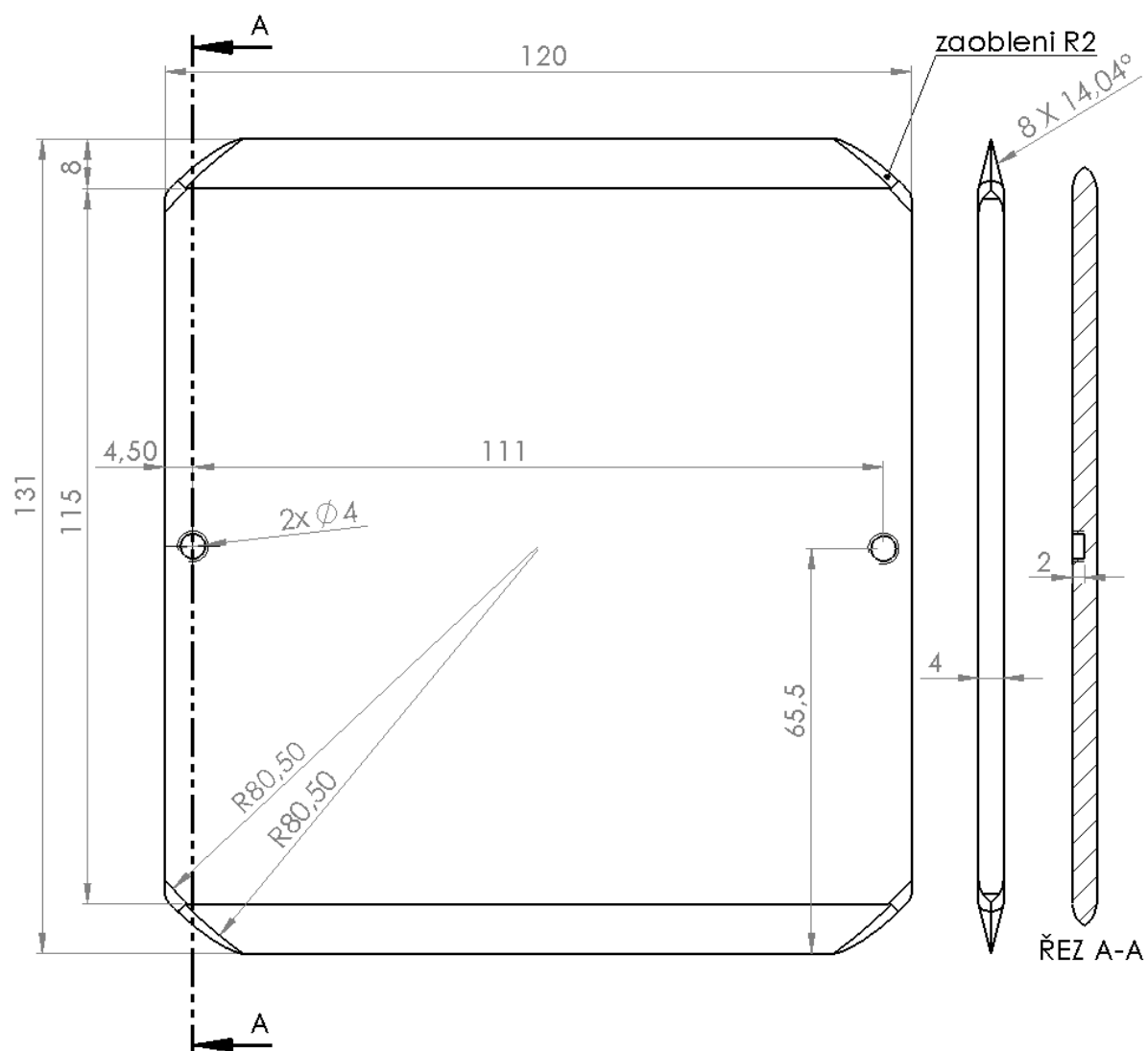
ŘEZ C-C  
Obr. 7-9: Pohled řezu C-C vany

### 7.3 Přítoková trubka



Obr. 7-10: Výkres přítokové trubky ve výsledném modelu

## 7.4 Fotovoltaický článek



Obr. 7-11: Výkres fotovoltaického článku ve výsledném modelu

## 8 Zhodnocení dosažených výsledků

Diplomová práce si kladla za cíl optimalizovat chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku pomocí systému CAE. Nejprve byl využit k testování simulační program SolidWorks Flow Simulation, kterému byly nastaveny zjednodušené výpočty, které? zahrnovaly v sobě přenos tepla vedením a prouděním chladícího média. Chladící medium je v tomto případě voda. Výpočty zpočátku nebraly v úvahu přenos tepla radiací. Cesta optimalizace je zachycena pěti zásadními modely, jejich výsledky jsou v práci podrobně zaznamenány.

### **Základní model**

Jeho problémem je nekonstantní teplota fotovoltaického článku, která se zvyšuje od osy přírodních trubek. Dalším problémem je narážení proudícího média na kolmou plochu fotovoltaického článku, což způsobuje tvoření vírů.

### **Model s vysavačovým přívodem**

Model s vytvořeným vysavačovým přívodem oproti základnímu modelu, který má přívod a odtok tvořen trubkovou částí, vykazuje daleko větší stálost teploty fotovoltaického článku. Jeho zásadním nedostatkem je přívodní proud chladícího média, který je odváděn směrem nahoru ke sklu. V modelu se tvoří velké množství vírů. Na závěr byl model podroben simulacím při snižování vzdálenosti mezi článkem a sklem (snižování vany), pro optimální chlazení fotovoltaického článku jsou výsledky kladné.

### **Optimalizovaný vysavačový model**

Zabraňuje předchozímu problému, již není proud chladícího média odváděn směrem na sklo. Sjednocením vzdáleností – umístěním článku doprostřed vany – stále nevykazuje přijatelnou cirkulaci chladícího média, vzniká stále velké množství vírů. Problémem je také přehřívání v jeho objemu, především v horní části vany nad článkem.

### **Vanový model**

Snížení vanové nádoby, vytvoření zaoblených hran a přidání válcového náhubku výrazně zamezilo vzniku vírů. Model se potýká s problémem vstupních vírů chladícího média v rozích vany. Válcový náhubek sebou přináší problémové chlazení na místě dotyku s fotovoltaickým

článkem. Jinak článek vykazuje velmi dobré teplotní výsledky. Teplota článku je velmi konstantní s výjimkou v oblasti upevnění samotného článku.

### Výsledný model

Upevnění článku v nádobě má tento model řešen jiným způsobem. Rohy vany jsou zkoseny. Vysavačový přívod a odvod byl zmenšen. Tvoření víru je zamezeno, cirkulace chladicího média je nejlepší ve srovnání s předchozími variantami. Chlazení článku je na velmi dobré úrovni.

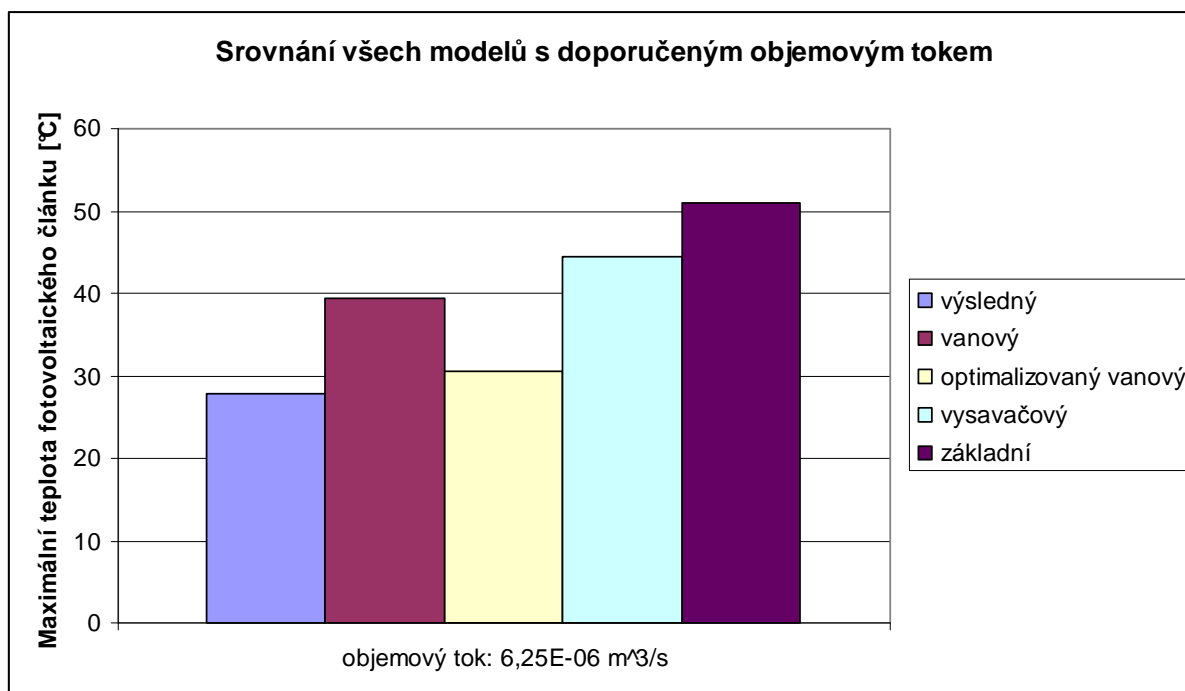
### Výsledný model s doporučeným objemovým tokem

Tento model je výsledkem celé optimalizace chlazení fotovoltaického článku. Vykazuje horší teplotní hodnoty než v předchozím výsledném modelu, ale přesto teplotní zahřátí článku je v požadovaných mezích. U modelu je výrazně nižší objemový tok, což umožní optimalizovat ekonomické náklady. Tento navrhovaný model je střední zlatou cestou.

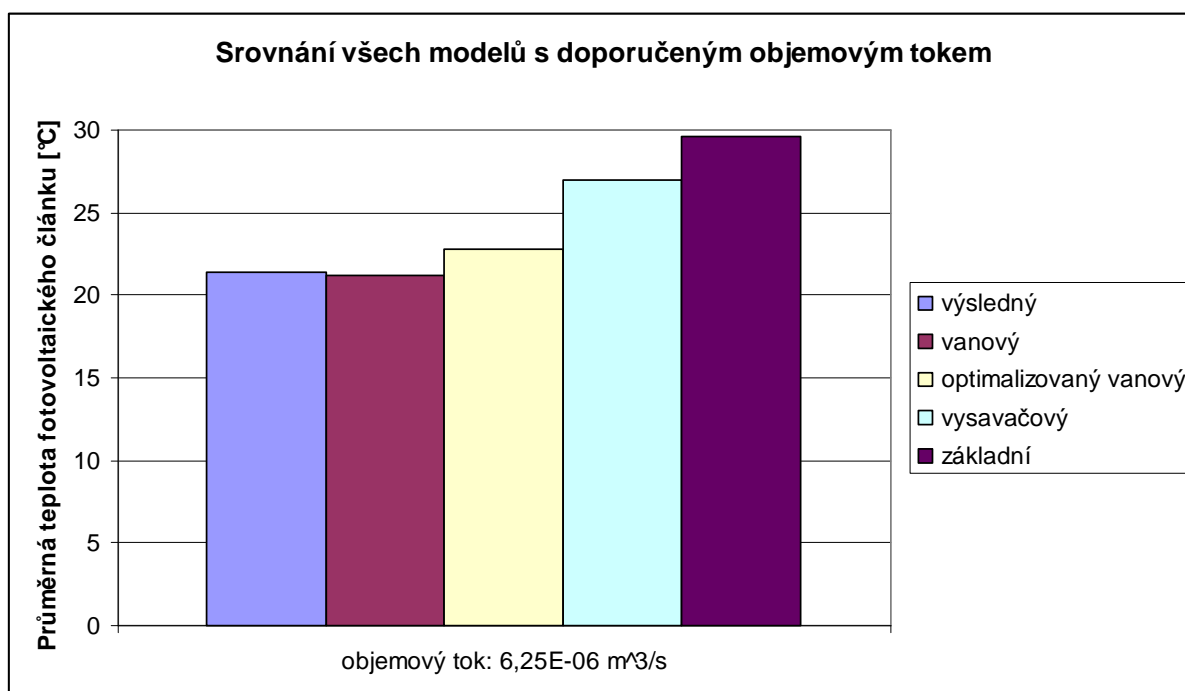
Zpětně byly jednotlivé modely podrobeny simulacím s objemovým tokem  $6,25\text{E-}06 \text{ m}^3/\text{s}$ , který je doporučen výslednému modelu. Výsledky jsou uvedeny v Tabulka 13. Graf Obr. 8-1 srovnává maximální teplotu fotovoltaického článku těchto simulací. Výsledný model vykazuje nejnižší maximální hodnotu a to  $27,78^\circ\text{C}$ . U srovnání průměrných teplotních hodnot fotovoltaického článku (Obr. 8-2), výsledný model vykazuje o  $0,28^\circ\text{C}$  horší hodnotu než u vanového modelu.

| verze                     | objemový tok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | teplota fotovoltaického článku [ $^\circ\text{C}$ ] |           |          |
|---------------------------|--|---|-----------|----------|
|                           |  | maximální   | minimální | průměrná |
| výsledný                  | $6,25\text{E-}06$                      | 27,78   | 20,62     | 21,45    |
| vanový                    | $6,25\text{E-}06$                      | 39,34   | 20,2      | 21,17    |
| optimalizovaný vysavačový | $6,25\text{E-}06$                      | 30,49   | 21,12     | 22,74    |
| vysavačový                | $6,25\text{E-}06$                      | 44,52   | 24,06     | 26,99    |
| základní                  | $6,25\text{E-}06$                      | 50,94   | 20,06     | 29,59    |

Tabulka 13: Srovnání všech modelů s doporučeným objemovým tokem



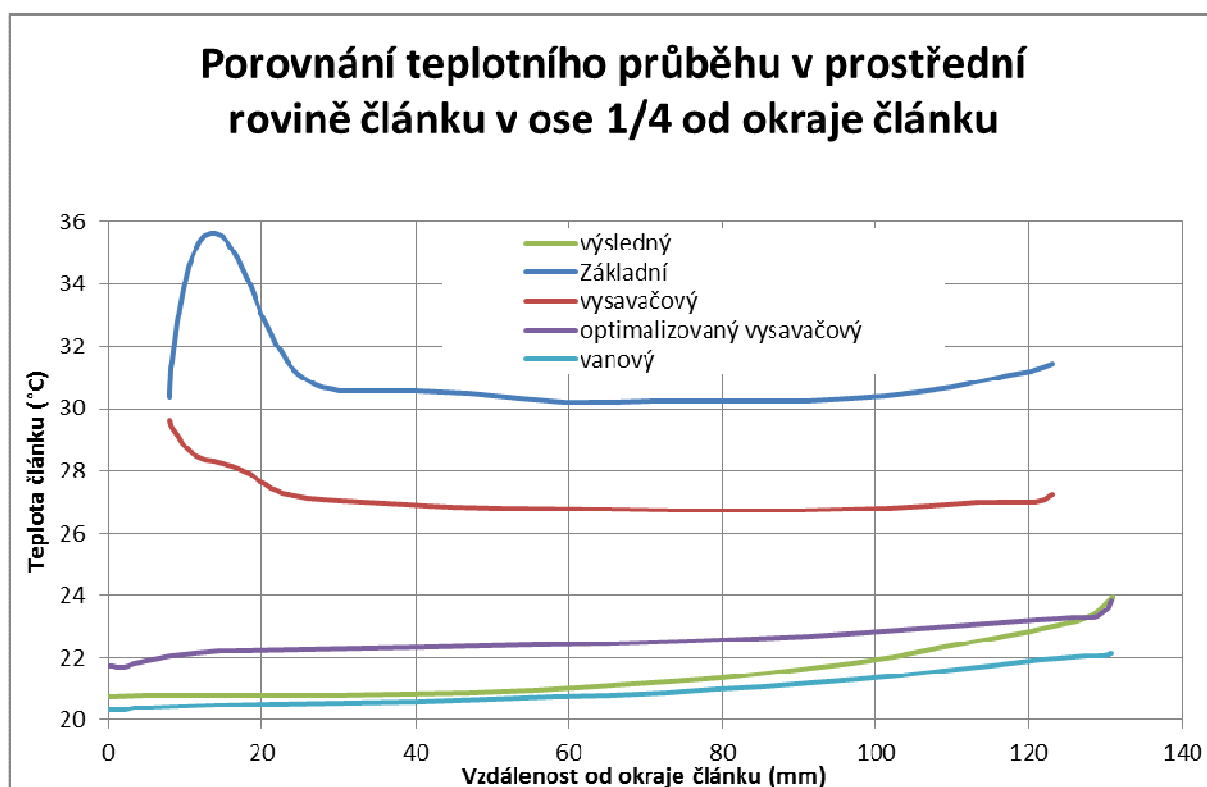
**Obr. 8-1: Grafické srovnání všech modelů ukazující maximální teplotu fotovoltaického článku s doporučeným objemovým tokem**



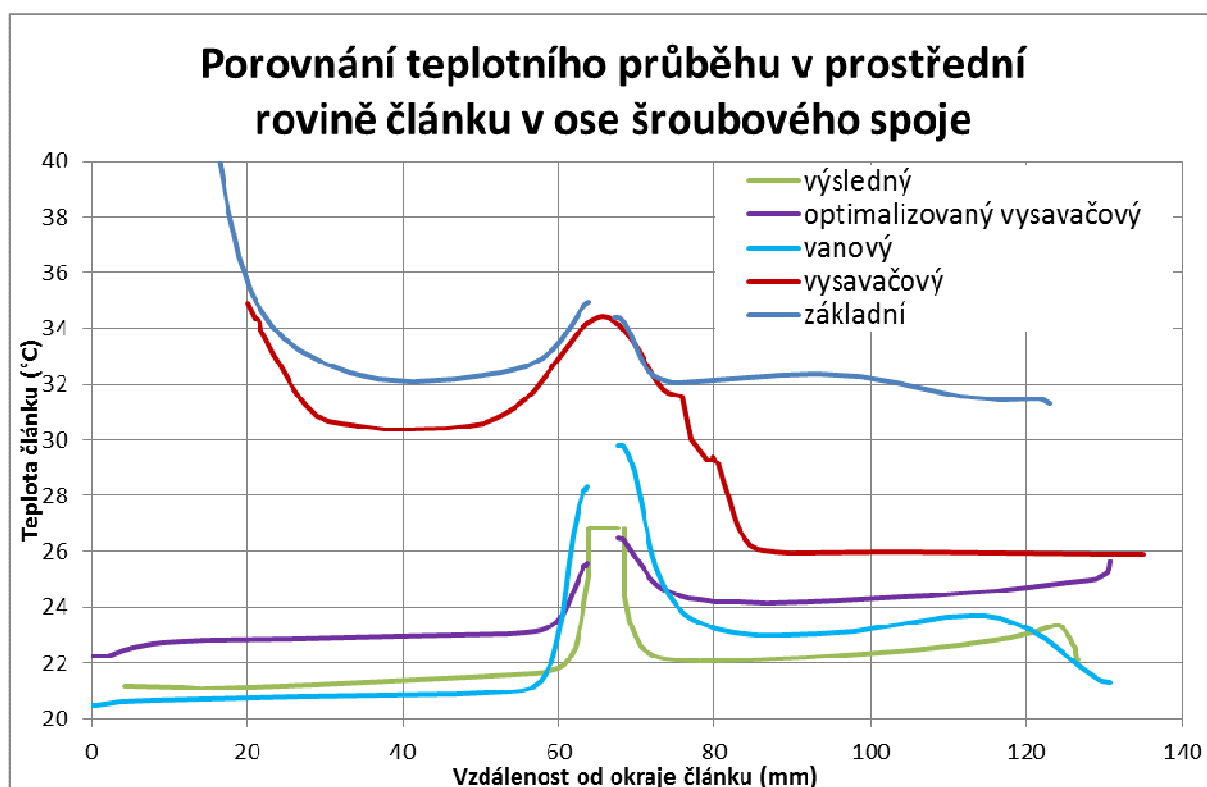
**Obr. 8-2: Grafické srovnání všech modelů ukazující průměrnou teplotu fotovoltaického článku s doporučeným objemovým tokem**

Graf Obr. 8-3 srovnává teplotní průběhy v ose 1/4 od okraje článku s doporučeným objemovým tokem  $6,25E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nejhorší teploty vykazuje základní model. Nejlépe je v těchto místech uchlazen vanový model. Výsledný model má oproti vanovému modelu po celou dobu o 1 až 2°C vyšší teplotu.





Obr. 8-3: Srovnání teplotních průběhů v ose 1/4 od okraje článku

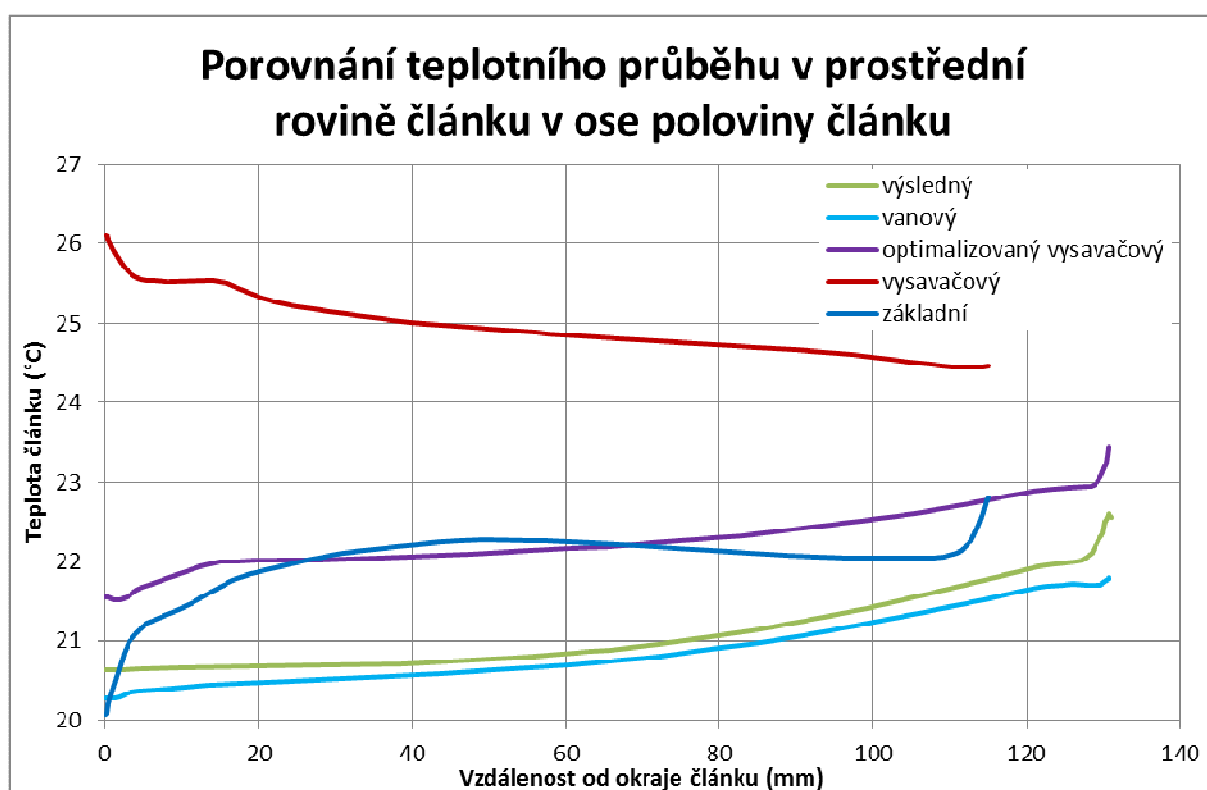


Obr. 8-4: Srovnání teplotních průběhů v ose šroubového spoje článku

Graf na Obr. 8-4 srovnává teplotní průběhy v ose šroubového spoje s doporučeným objemovým tokem  $6,25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Od strany přítoku je nejdříve lépe uchlazen vanový model

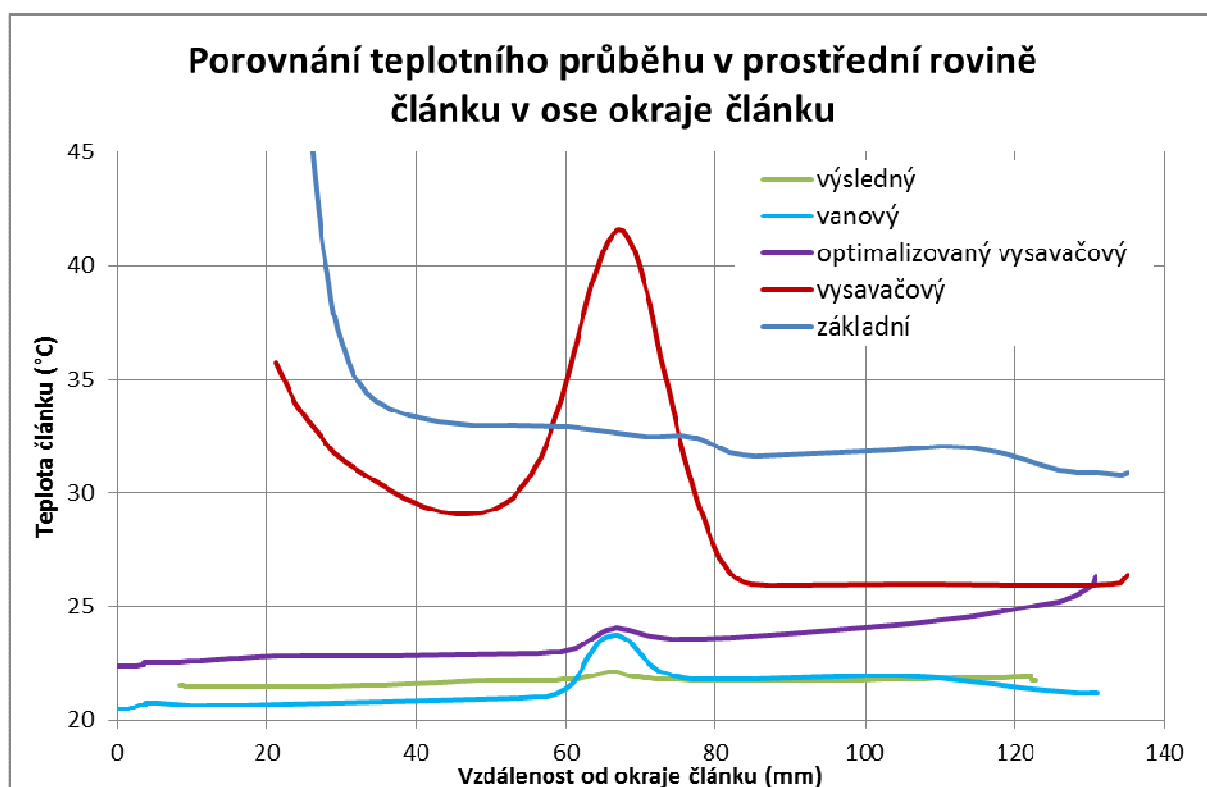
až do oblasti šroubového spoje. V samotném spoji je lépe uchazen výsledný model než vanový. Po spoji je nejlépe uchazen výsledný model. V této ose vykazuje i dobré teplotní hodnoty optimalizovaný vysavačový model – je v této ose nejkonstantnější.

Graf na Obr. 8-5 srovnává teplotní průběhy v ose poloviny článku s doporučeným objemovým tokem  $6,25E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zde je nejhorší chlazení u vysavačového modelu. Nejlepší hodnoty vykazuje vanový model, křivka výsledného modelu opět kopíruje křivku vanového modelu jen s nepatrnou vyšší teplotou 0,3 až 0,4 °C.



Obr. 8-5: Srovnání teplotních průběhů v ose poloviny článku

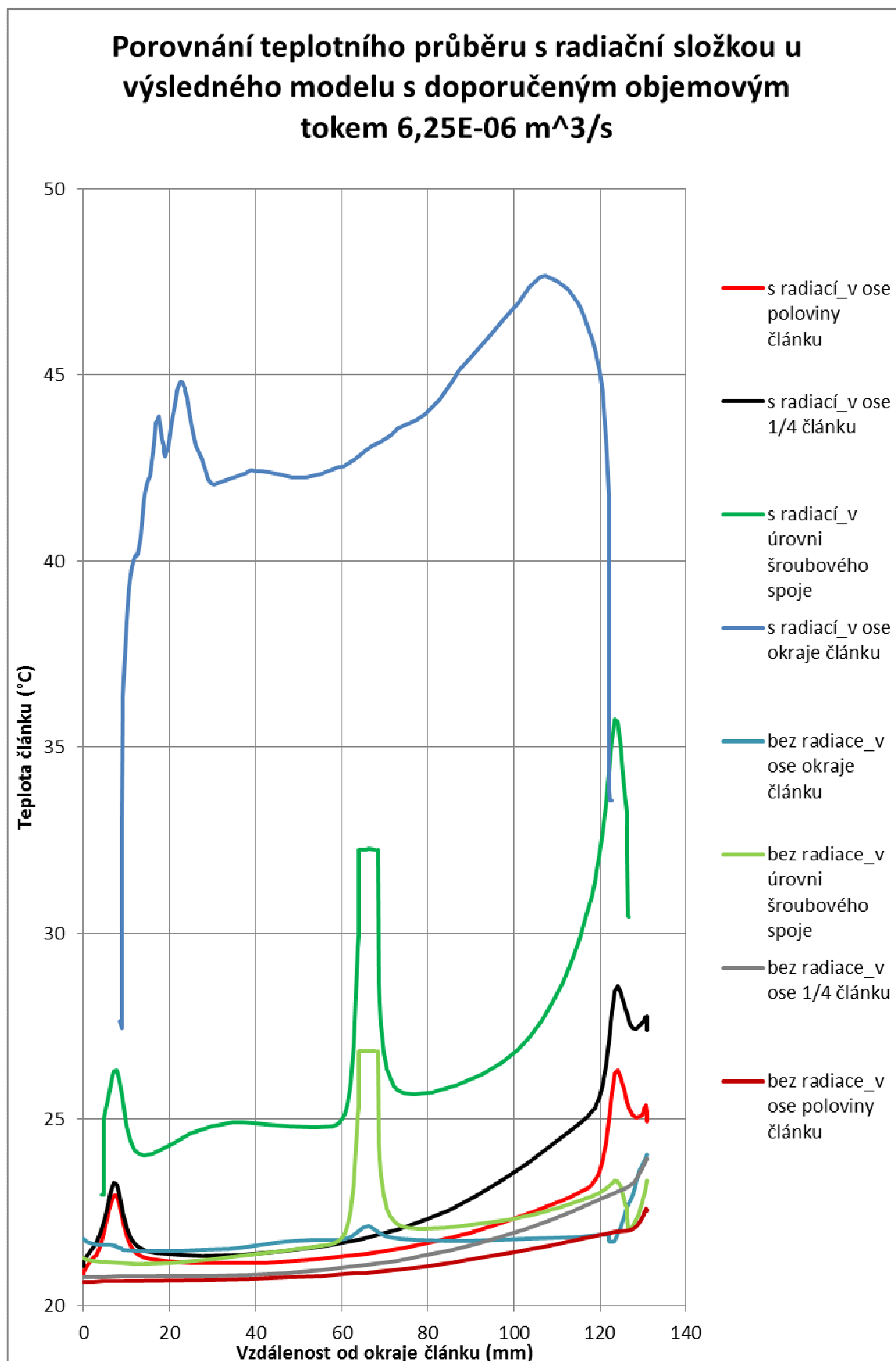
Graf na Obr. 8-6 srovnává teplotní průběhy v ose okraje článku s doporučeným objemovým tokem  $6,25E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kde nejhůře chlazenými modely jsou základní a vysavačový. Vysavačový vykazuje extrémní výkyvy v oblasti šroubového spoje. Na okraji článku je nejkonstantněji chlazen výsledný model. Vanový model má větší výkyv v oblasti šroubového spoje.



Obr. 8-6: Srovnání teplotních průběhů v ose okraje článku

V dalším kroku byl podroben výsledný model simulacím, které v sobě zahrnovaly i přenos tepla radiací. Následně byly tyto výsledky srovnány s výsledným modelem bez radiační složky.

Graf na Obr. 8-7 srovnává teplotní průběhy ve výsledném modelu s radiací a bez ní při doporučeném objemovém toku  $6,25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Radiační složka výrazně ovlivňuje chlazení článku. Nejrozdílnější hodnoty vykazuje na kraji článku a v oblasti šroubového spoje – jsou to nejproblémovější oblasti v celé této práci. V ostatních částech radiační složka nijak výrazně nemění hodnoty oproti výslednému modelu bez radiace.



Obr. 8-7: Srovnání teplotních průběhů s uvažovanou radiací

## 9 Závěr

Diplomová práce měla za úkol řešit problematiku optimalizace chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku pomocí systému CAE. V první části práce pojednává o fotovoltaice jako takové se zaměřením na koncentrátorové články s následným problémem chlazení a odvodu tepla. Další teoretická kapitola se věnuje problematice vedení a přenosu tepla. V této části je uveden matematický popis proudění tekutiny. Dále je v práci rozebrána metoda konečných objemů, kterou využívá pro výpočet program SolidWorks Flow Simulation.

Jako nástroj pro vykonání optimalizace chlazení koncentrátorového článku byl použit program SolidWorks, který pracuje jako parametrický 3D modelář a umožňuje nám výkonné objemové i plošné modelování a automatické generování výrobních výkresů. Dále má v sobě integrovaný program pro analýzu proudění tekutin, SolidWorks Flow Simulation.

Během výzkumu bylo provedeno celkem 146 simulací. V práci jsou uvedeny jen zásadní modely a kroky, které vystihují sled celé optimalizace chlazení. Varianty byly počítány pro dva typy přenosu tepla – přestup tepla vedením a prouděním. Výsledky jsou prezentovány ve formě tabulek, obrázků a grafů, které jsou výstupy ze simulačního programu SolidWorks Flow Simulation. V poslední variantě byl v testu také uvažován přenos tepla radiací z důvodů dosažení přesnějších výsledků.

V kapitole zhodnocení výsledků jsou porovnány všechny předložené varianty. Na základě teoretického předpokladu, že koncentrátorový článek nesmí dosáhnout na žádném místě více jak  $70^{\circ}\text{C}$ , je snaha maximální teplotu srazit na co nejmenší v důsledku výkonu koncentrátorového článku, optimální požadovaná teplota pro článek se pohybuje v rozmezí  $20$  až  $30^{\circ}\text{C}$ . Nejlépe těmto požadavkům vyhovuje výsledný model s objemovým průtokem  $6,25\text{E}-06 \text{ m}^3/\text{s} = 6,25 \text{ ml/s}$  (médium voda). Tento výsledný model vykazuje maximální teplotu  $27,78^{\circ}\text{C}$  (s uvažovanou radiací  $53,92^{\circ}\text{C}$ ) a průměrnou hodnotu  $21,45^{\circ}\text{C}$  (s uvažovanou radiací  $23,4^{\circ}\text{C}$ ). Nejproblémovější oblastí chlazení jsou okraje článku a oblast šroubového spoje.

V diplomové práci je také uvedena výkresová dokumentace výsledného modelu, který výrazně optimalizuje chlazení předloženého koncentrátorového článku.

## 10 Literatura

- [1] *Fotovoltaické solární systémy*. Ostrava, 2009. Dostupné z: <http://rccv.vsb.cz/Island/docs/Fotovoltaika.pdf>.
- [2] PETERA, J. a HEŘMAN, J. *Fotovoltaika*. Dostupné z: <http://www.rescompass.org/IMG/pdf/Fotovoltaika.pdf>.
- [3] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [4] ŠÚRI, Marcel, Thomas A. HULD, Ewan D. DUNLOP, Heinz A. OSSENBRINK, National Renewable Energy Laboratory (NREL), GOLDEN a CO. *Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries*. ISBN 1295-1305.
- [5] EGF, spol. s r. o. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění na Šumavě* [online]. 2009 [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.npsumava.cz/gallery/5/1610-vyuzitiozenasumave.pdf>
- [6] ŘEHÁK, Jaromír, Jiří BÁRTEK a Radim BAŘINKA. SOLARTEC S.R.O. *Fotovoltaika a fotovoltaické systémy v podmínkách ČR a jejich navrhování*. Rožnov pod Radhoštěm: Česká energetická agentura.
- [7] *Fotovoltaika pro budovy*. ČVUT v Praze, 25 s. Dostupné z: [http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/Prezentace/FV%20pro%20budovy\\_prehled%20technologie.pdf](http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/Prezentace/FV%20pro%20budovy_prehled%20technologie.pdf).
- [8] *Princip činnosti fotovoltaického článku*. [cit.2013-12-4]. Dostupné z: <http://www.solarhaus.cz/img/nahledy/schema.jpg>
- [9] HŘEŠIL, T. *Analýza chlazení koncentrátorového fotovoltaického článku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2013. 69 s., 3 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [10] Solární energie. KUSALA, J. *Solární energie* [online]. 2006 [cit. 2013-12-05]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>
- [11] BANNERT, Petr. *Vliv teploty na vlastnosti fotovoltaických článků*. Varnsdorf: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola, 2012, 7 s. Dostupné z:

[http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS\\_008\\_cviceni/008\\_vliv\\_teploty\\_na\\_fvc.pdf](http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/FVS_008_cviceni/008_vliv_teploty_na_fvc.pdf)

- [12] STRAŠKRABA, V. *Koncentrátorové fotovoltaické systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 45 stran. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [13] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie. *Světlo*. 2005, č. 1, s. 5. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>
- [14] MOTLÍK, Jan. KOLEKTIV. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*. Praha: ČEZ, a.s., 2007. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>
- [15] MAXA, J. *Analýza proudění plynů v zařízeních elektronového mikroskopu*. Vysoké učení technické v Brně, 2008. 182 stran.
- [16] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Vysoká škola Báňská – technická univerzita Ostrava, 2008. 154 stran.
- [17] MACHÁČKOVÁ, A., KOCICH, R.: *Sdílení tepla a proudění*. Ostrava: VŠB - Technická universita Ostrava, 2012. 194 stran. ISBN 978-80-248-2576-2.
- [18] SolidWorks Flow Simulation 2012 Tutorial
- [19] SOLIDVISION. *Solidworks* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/>
- [20] JEŽEK, J. *Mechanika tekutin*. České vysoké učení technické v Praze, 2000. 151 stran.

## Seznam použitých zkratek a veličin

|               |                                  |                   |
|---------------|----------------------------------|-------------------|
| $c$           | rychlost světla                  | $m/s$             |
| $h$           | Planckova konstanta              | $J.s$             |
| $\lambda$     | vlnová délka                     | $m$               |
| $E$           | energie záření                   | $eV$ nebo $J$     |
| $f$           | frekvence                        | $Hz$              |
| $U$           | elektrické napětí                | $V$               |
| $I$           | elektrický proud                 | $A$               |
| $P$           | výkon                            | $W$               |
| $m$           | hmotnost                         | $kg$              |
| $t$           | čas                              | $s$               |
| $T$           | termodynamická teplota           | $K$               |
| $F$           | síla                             | $N$               |
| $W$           | práce                            | $J$               |
| $Q$           | teplo                            | $J$               |
| $q$           | tepelný tok                      | $W$               |
| $p$           | tlak                             | $Pa$              |
| $\lambda$     | tepelná vodivost                 | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| $\partial T$  | derivace teploty                 | $K$               |
| $\partial n$  | derivace směru normály           | $m$               |
| $v$           | rychlost proudění                | $m/s$             |
| $Re$          | Reynoldsovo číslo                | -                 |
| $\rho$        | hustota tekutiny                 | $kg/m^3$          |
| $\eta$        | dynamická viskozita tekutiny     | $Pa.s^{-1}$       |
| $\nu$         | dynamická viskozita tekutiny     | $m^2/s$           |
| $p$           | hybnost částice                  | $kg.m.s^{-1}$     |
| $E$           | intenzita záření                 | $W.m^{-2}$        |
| $S$           | plocha                           | $m^2$             |
| $\sigma$      | Stefanova-Boltzmannova konstanta | $W.m^{-2}.K^{-4}$ |
| $\varepsilon$ | emisivita materiálu              | -                 |
| $h$           | součinitel prostupu tepla        | $W/(m^2.K)$       |
| $A$           | teplotní součinitel plochy       | $m^2$             |
| $d$           | průměr                           | $m$               |
| $MKO$         | Metoda konečných objemů          |                   |
| $CAE$         | Computer-aided engineering       |                   |